

Mikroklima und Pflanzentemperaturen auf trocken-heißen Standorten

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
der Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

ALBRECHT VAUPEL

aus Berlin

1958

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Br. Huber
2. Berichterstatter: Prof. Dr. L. Brauner

Tag der mündl. Prüfung: 10.7.57

Abdruck aus der
Flora oder allgemeinen botanischen Zeitung. Bd. 145. 1958
Herausgegeben von
F. FIRBAS, Göttingen, K. MÖTHES, Halle/Saale, und A. PIRSON, Marburg
VEB GUSTAV FISCHER VERLAG · JENA

Satz und Druck: Druckerei „Magnus Poser“, Jena

Printed in Germany

Lizenznummer ZLN 5092



Mikroklima und Pflanzentemperaturen auf trocken-heißen Standorten

Von **Albrecht Vaupel**

Mit 15 Abbildungen im Text

Eingegangen am 28. Juni 1957

Einleitung

Unsere heutige Kenntnis vom Wärmehaushalt der Pflanze wurde auf zwei Wegen gewonnen: der erste, fast ausschließlich verfolgte, geht von der empirisch gefundenen tatsächlichen Temperatur aus. Die meisten dieser Messungen sind Einzelmessungen, die als Augenblickswerte dem Zufall unterworfen sind und mehr über die Größenordnung aussagen als über das charakteristische, kausal-analytisch zu erfassende Verhalten und Zustandekommen. Dem Bemühen, durch Aneinanderreihen von Einzelmessungen in kurzer Zeitfolge zu einer besseren Kenntnis vom Temperaturverlauf innerhalb eines pflanzlichen Organismus zu kommen (FRITZSCHE, GERLACH), setzt die menschliche Leistungsfähigkeit eine frühe, entscheidende Grenze. Wir müssen uns heute — dem Beispiel HUBERS (1937) folgend — der Registrierung bedienen, wenn wir aus lückenlosen Tagesgängen das Allgemeine wie das Besondere erkennen wollen. Werden solche Temperaturregistrierungen noch sinnvoll ergänzt durch zusätzliche und synchronlaufende Beobachtungen von Strahlung, Luftbewegung, Verdunstung usw., dann wird es gelingen, jenes Wechselspiel der bestimmenden Faktoren (vgl. HUBER 1935) nach Ursache und Wirkung zu durchschauen und verbindliche Angaben quantitativer Art über die augenblickliche Temperatur und den täglichen Temperaturgang zu machen.

Der zweite Weg stellt die energetische Behandlung des Problems voran (BROWN und ESCOMBE, SEYBOLD) und ist jüngst wieder (RASCHKE) begangen worden. Er führt zu einer Wärmehaushaltsgleichung, die die Fülle der Messungen einerseits mit der Kenntnis der wirksamen Faktoren andererseits unter dem Gesichtspunkt der Energiebilanz allgemeingültig verbindet und einigt (Ansätze dazu bei BROWN und ESCOMBE, HUBER 1935). Von meteorologischer Seite (ALBRECHT, HOFMANN, GEIGER) ist inzwischen eine

Energiebilanzaufstellung erarbeitet worden, die für die Oberfläche eines „Versuchskörpers“ (GEIGER), bezogen auf Flächen- und Zeiteinheit, summarisch lautet:

$$S + B + L + V = 0$$

(mit den Energieströmen aus der Strahlungsbilanz [S], der Wärmeleitung [B], dem Wärmeübergang [L] und der Verdunstung [V], die durch die Temperatur der Oberfläche miteinander gekoppelt sind). Es steht zu hoffen, daß dieser Fortschritt auch die andere Seite des Wärmehaushaltes der Pflanze stärker belebt (s. WEISE, BAUMGARTNER).

Sind wir heute über die Temperatur der Pflanze und ihr Zustandekommen im Grundlegenden genügend unterrichtet (HUBER 1935), so kennen wir die Pflanzentemperaturen unter natürlichen Bedingungen und an verschiedenen Standorten sowie in anderen Klimagebieten noch nicht oder nur unvollkommen. Die vorliegende Arbeit will daher mit der Untersuchung der tatsächlichen Verhältnisse auf xerothermen Standorten im allgemeinen als auch im mediterranen Raum mit seinem „clima caldo-arido“ (PAVARI) im besonderen diese Lücke schließen helfen. Sie stützt sich auf vollständige Registrierungen von Tagesgängen, die unter den verschiedensten, zum Teil experimentellen Bedingungen im mainfränkischen Wellenkalkgebiet bei Gambach/Main und in Sizilien auf dem Monte Pellegrino bei Palermo aufgenommen worden sind. Bisher besitzen wir aus beiden Gebieten nur stichprobenhafte Einzelmessungen (KRAUS, SCHANDERL bzw. PASSERINI, GUTTENBERG, ROUSCHAL, KNAPP). Mit diesen Registrierungen folgt die Untersuchung dem ersten der beiden genannten Wege; doch sollen die Ergebnisse dargestellt werden unter dem Gesichtspunkt der obengenannten Energiebilanzgleichung.

Methodik

Die Temperaturen wurden mit Thermoelementen gemessen, deren feine Meßfühler (Kupfer 0,04 mm Ø, Konstantan 0,2 mm Ø; Länge rund 28 cm) an der Spitze in hochglanzpolierten Kanülen, dahinter in flexiblen Kunststoffschläuchen eingeschlossen waren, während für die bis zu 12,5 m langen Zuleitungen dickere Drähte (1,0 bzw 1,5 mm Ø) gleicher Charge verwendet wurden. Registriert wurde mit einem Sechs-Farben-Punktschreiber (Multithermograph von HARTMANN und BRAUN). Die Thermoelemente waren so berechnet, daß bei einem äußeren Widerstand von etwa 12,5 Ω und einem inneren Widerstand von rund 10,3 Ω sowie einer Bezugstemperatur von 15° bzw. 25° C nach oben bis zu etwa 75°, nach unten bis etwa 10° unter Bezugstemperatur gemessen werden konnte.

Um bei diesen Registrierungen im Freien über längere Zeiträume hinweg eine möglichst einfach zu realisierende und dabei doch konstante Bezugstemperatur zu haben, wurden die passiven Lötstellen — zusammen mit einem Quecksilberbodenthermometer (FUESS) — in einer mit Paraffin gefüllten Thermosflasche etwa 30—50 cm

tief eingegraben, die Bezugstemperatur 3stündig kontrolliert. Die Schwankungen der Bezugstemperatur waren unbedeutend ($1/10 - 2/10^\circ$), der Strahlungsfehler verschwindend klein. Die Thermoelemente wurden jeweils in meßbereitem Zustande an Ort und Stelle mehrfach geeicht.

Aus den Registrierungen wurden je 5 Werte ($\equiv 10$ min) zu einem Mittelwert zusammengezogen, der — soweit nicht anders vermerkt — in die Darstellung eingegangen ist.

Ergänzt wurden die Registrierungen durch Messung der Strahlungsintensität bzw. -dauer, durch laufende 3stündige Beobachtung der allgemeinen Wetterlage (Internationaler Wetterschlüssel, deutsche Ausgabe; ihm sind auch die in den Darstellungen verwendeten Symbole entnommen) sowie durch längere Tagesreihen von Feuchtemessungen mit dem ASSMANNschen Aspirationspsychrometer in halbstündigen Intervallen.

(Ausführliche Unterlagen sind im Forstbotanischen Institut der Universität München hinterlegt.)

A. Die Untersuchungen im mainfränkischen Wellenkalkgebiet am Krainberg bei Gambach (Main)

1. Allgemeines über Lage, Klima, Boden und Flora

Im Regenschatten des Spessart liegend ist das mainfränkische Wellenkalkgebiet mit 565 mm Jahresniederschlag (ALT) eine der trockenen Gegenden Deutschlands. Doch verteilen sich diese Niederschläge nahezu gleichmäßig über das Jahr (vgl. Klimadiagramm S. 515; näheres dazu bei WALTER) mit einem Maximum in den Sommermonaten, in denen jeder zweite Tag ein Niederschlagstag ist. Die Niederschläge fallen an dem Steilhang des Krainberges bei Gambach/Main auf einen hellgrauen, flachgründigen Boden, der — teils staubfein, teils schuttartig, dazwischen immer wieder das Grundgestein zeigend — schütter bezogen ist von den Pflanzen des *Xerobrometum seslerietosum* (*Sesleria-Teucrium montanum*-Assoziation nach VOLK, der auch eine genaue Standortsbeschreibung gibt).

Die Versuche wurden in der Zeit vom 8. Juli bis 10. September in der Nähe der Ökologischen Station des Würzburger Botanischen Institutes durchgeführt, an einer Stelle, wo der Hang in SW-Exposition (Abb. 1) mit einer Neigung von etwa $30-35^\circ$ abfällt. Die Messungen waren erheblich beeinträchtigt durch die naßkalte Witterung des Sommers 1954, die es gar nicht zu einer nachhaltigen Erwärmung des Bodens und damit zur Ausbildung von typischen Standortsverhältnissen kommen ließ. Sie konnten nur für einige Tage (Anfang August und Anfang September) ausgewertet werden. Selbst an den schönen Tagen ließ häufige, zum Teil stärkere Bewölkung, namentlich in den Mittagsstunden, die registrierten Punktfolgen zu unentwirrbaren Girlanden werden, aus denen wenig an Gesetzmäßigkeit geschöpft werden kann. Ein ideal schöner Sommertag ist in unserem Klimagebiet ein selten eintretender Grenzfall. Gerade darum sind die schon erwähnten zusätzlichen Messungen der verschiedenen Größen der Energiebilanz notwendig.

Die Thermoelemente waren bei den Messungen längs der Rippe der Blätter von der Schattenseite her eingeführt. Diese Prozedur ist sehr fragwürdig, denn ich vermag

nicht anzugeben, in welcher Weise bei dieser rauen Behandlung die Wasserversorgung und damit die Transpiration unnatürlich verändert wird. Auch erhebt sich bei Messungen mit Thermoelementen in dünnen Blättern die Kardinalfrage: messen wir eine Organtemperatur oder die Temperatur eines Thermoelementes mit einem dünnen pflanzlichen Überzug?

In einer ersten Versuchsreihe sollten am Steilhang des Krainberges die Temperaturen der typischen Pflanzen am natürlichen Standort in einem charakteristischen Tagesgang dargestellt und die Gesetzmäßigkeiten herausgeschält werden; in einer

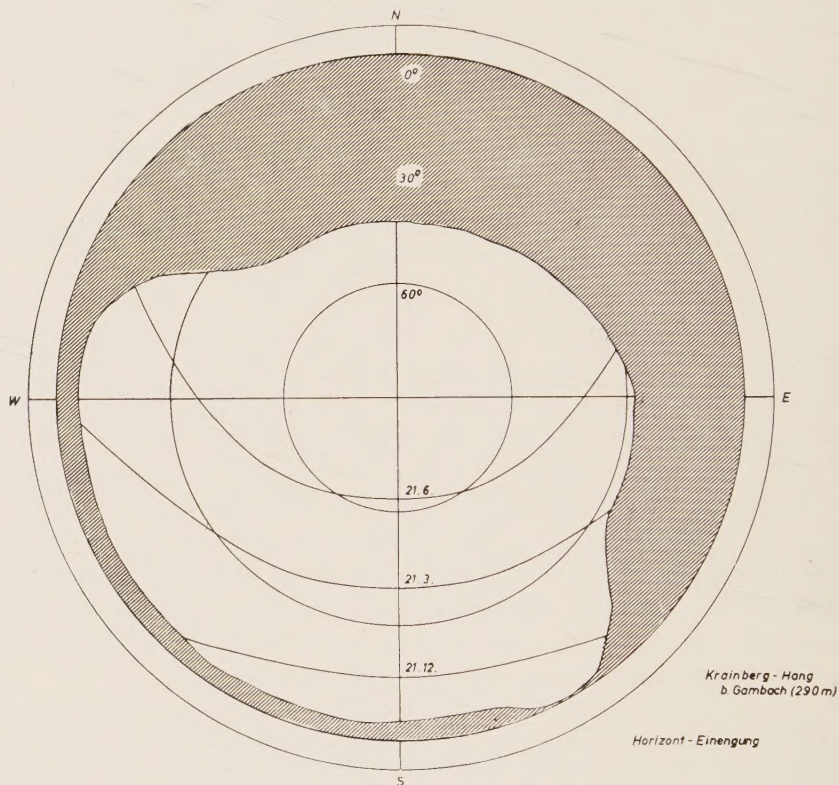


Abb. 1. Horizonteinengung für den Standort am Krainberg bei Gambach/Main (vgl. dazu LAUSCHER).

zweiten Serie sollten die Temperaturen der Pflanzen in Experimenten verfolgt werden, die sie unter verschiedensten Bedingungen (Zwangslagen, extreme Exposition, Ausschaltung von Konvektion usw.; s. HUBER 1935) annehmen müssen.

2. Der Tagesgang der Temperatur in Pflanzen am Steilhang

Als bester Tag sei der 6. August 1954 vorgestellt (Abb. 2); ein schwüler Tag (Taufall nachts, morgens Nebel), bei zunehmender Bewölkung am Nachmittag stärker windig als am Vormittag: übersteigertes Schönwetter.

Die Temperatur des Bodens wurde in 2 cm Tiefe, die Temperatur der bodennahen Luft in 15 cm Höhe (hinter einem behelfsmäßigen Strahlungsschutz) verfolgt. Die Messung der Bodenoberflächentemperatur wagte ich (soviel notwendiger sie gewesen wäre) nicht angesichts der ungeschützten Thermoelemente; auch war die Oberfläche ständig in Bewegung, und damit dauernder, unkontrollierbarer Veränderung unterworfen.

Von den für den Standort typischen Pflanzen wählte ich ein Blatt von *Lactuca perennis* in 8—9 cm Höhe, das mit seiner Spreite senkrecht aus einem mit Schottersteinen zugedeckten Boden emporragte (Profilstellung: NNE-SSW-exponiert). In gleicher Höhe, doch 10 m weiter, wuchs auf feinsandiger Bodenhaut ein Exemplar von *Peucedanum cervaria*, in dessen einer Rhachis (in $\pm$ bodenparalleler Lage) in 8—9 cm Höhe gemessen wurde. Endlich fand sich weiter hangaufwärts, wo die Neigung schon merklich flacher wurde, und wo der Bewuchs schon in eine praktisch geschlossene Bedeckung überging, ein Vertreter von *Eryngium campestre*; in einem Fiederteil in SW-Exposition, dessen Flügel nahezu senkrecht zur einfallenden Strahlung der Nachmittagsstunden stand, wurde die Temperatur ermittelt.

Die Registrierung wurde für die Zeit von 8 bis 15.30 Uhr ausgewertet. Nach diesem Zeitpunkt fallen die Kurven wegen der Bewölkung eines herannahenden Frontgewitters in unübersichtlichen Girlanden ab. Daher wurde zweifellos das Tagesmaximum an diesem SW-Hang nicht erreicht, das nach anderen Beobachtungen in den Nachmittagsstunden auftritt.

Der Boden in 2 cm Tiefe erreicht mit 45° eine beachtlich hohe Temperatur. Denn es ist zu bedenken, daß sich der Boden infolge der vorausgegangenen kühlfeuchten Witterungsperiode noch nicht hat sommerlich durchwärmen können. Die hohe Temperatur in dieser Tiefe läßt (auf Grund gleich hoher Temperatur in Sizilien) an diesem Hang auf eine Oberflächen-temperatur von etwa 60° (wie in Sizilien) schätzen. Sie könnte wegen anderer Bodenkonsistenz und besserer Exposition noch höher liegen; doch geht in unserem Klima ein gewisser Teil der eingestrahnten Energie durch die Evaporation für die Erwärmung des Bodens verloren (vgl. BAUMGARTNER). Auch HEILIG fand im Kaiserstuhl (allerdings mit einem Quecksilberthermometer in der Oberfläche) 68° . Und schließlich weist die hohe Temperatur der bodennahen Luft (Tagesmaximum: 43°) auf eine sehr heiße Bodenoberfläche hin.

Bei einer ersten Betrachtung der Pflanzentemperaturen, die untereinander sehr gleichsinnig verlaufen — ein Zeichen für die mikroklimatische Einheitlichkeit des Standortes trotz der verschiedenen und auseinanderliegenden Positionen der einzelnen Objekte —, bemerken wir eine Gleichsinnigkeit des Temperaturverlaufes mit der Lufttemperatur in 15 cm Höhe — ein Merkmal dünner Organe, die infolge ihrer geringen Masse einerseits und ihrer außerordentlich großen Oberfläche andererseits auffällig der Temperatur der umgebenden Luft folgen müssen. Länger anhaltende Änderungen im Energiestrom durch Strahlung und Verdunstung aber verlegen das

gesamte Niveau der Gleichgewichtstemperatur. So z. B. beim *Lactuca*-Blatt, dessen NNE-exponierte Spreite von der aufgegangenen Sonne zwischen 9 und 10 Uhr fast voll getroffen und daher stärker erwärmt wird als etwa die *Eryngium*-Fieder. Andererseits sinkt zwischen 11 und 11.30 Uhr — während alle anderen Temperaturen weiter ansteigen — diejenige vom *Lactuca*-Blatt

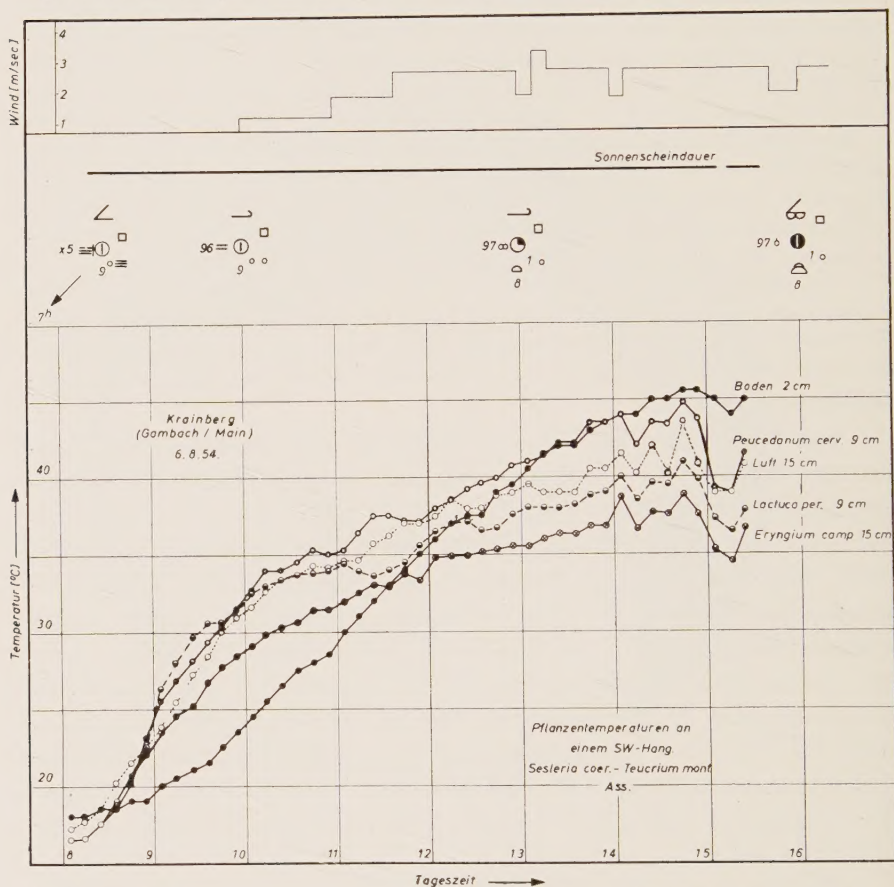


Abb. 2. Pflanzentemperaturen am Krainberg bei Gambach/Main (6. 8. 1954).

ab, weil um diese Zeit die aufrechte Spreite bei ihrer Profilstellung nur mehr über die Kante von der Sonne streifend getroffen wird. Wir erkennen es ferner an der *Peucedanum*-Rhachis, die sich seit der beginnenden Einstrahlung immer stärker erwärmt; als drehrundes Organ ist sie, dazu noch in bodenparalleler Lage, stets der Sonnenstrahlung voll ausgesetzt.

Die grünen Organe erwärmen sich im Maximum nicht über 41° (*Lactuca*) bzw. über 39° (*Eryngium*), liegen damit keineswegs extrem hoch; nur die

Peucedanum-Rhachis kommt auf fast 45° . Auffällig ist nun, daß die Temperaturen vom *Lactuca*-Blatt und von der *Eryngium*-Fieder unter der Temperatur der bodennahen Luft liegen, während die *Peucedanum*-Rhachis bis zu 3° darüber ansteigen kann. Es müssen also für die beiden ersten Objekte „Energieverluste“ wirksam werden, die ihre Gleichgewichtstemperatur unter die der umgebenden Luft drücken, während für die *Peucedanum*-Rhachis, wie schon erwähnt, ein Energiegewinn zu einer über die Temperatur der Luft steigenden Gleichgewichtstemperatur führt. Bei annähernd gleicher Konvektion (L) kommen nur Strahlung (S) und Verdunstung (V) für dieses Verhalten in Frage. Die *Peucedanum*-Rhachis ist praktisch die ganze Zeit über der vollen Sonnenstrahlung ausgesetzt und hat als verholztes Organ keine Verdunstung. Anders das *Lactuca*-Blatt. Auf die senkrecht zum Boden aufstehende Spreite (NNE-SSW-exponiert) fällt die Strahlung bei höher stehender Sonne sehr flach ein. Aber selbst in den Nachmittagsstunden, wo sie schon voller auf die jetzt mehr exponierte Spreite treffen muß, resultiert keine Übertemperatur: Die Verdunstung des grünen Blattes führt zusammen mit der Profilstellung zu einer Temperatur unter der Lufttemperatur (s. SCHANDERL 1930, S. 800).

Da die weiteren Nachmittagsstunden nicht ausgewertet werden konnten, fehlt natürlich die Zeit, wo die sinkende Sonne voll die Spreite trifft und sich daher vielleicht ähnliche Verhältnisse einstellen wie am Vormittage (wenn nicht durch die gegenüber den Morgenstunden stärkere Hangerwärmung auch die Temperaturen der bodennahen Luft höher liegen und damit die Differenz gegen die bestrahlte Pflanze verschoben wird).

Gleiches wie für das *Lactuca*-Blatt dürfen wir für die *Eryngium*-Fieder annehmen, die in ähnlicher Exposition wie das *Lactuca*-Blatt steht. Hier scheint die Differenz zwischen Blatt und umgebender Luft noch größer zu sein. Es sind für *Eryngium* große Spaltöffnungsweiten angegeben (BOSIAN, SCHANDERL [1930]); auch steht das Exemplar höher am Hang auf schon ganz bedecktem Boden, über welchem die Lufttemperatur aber nicht gemessen werden konnte.

Zu dieser Beobachtung tritt eine zweite: mit einsetzendem Winde um 10 Uhr wird der steile Temperaturanstieg der frühen Vormittagsstunden allgemein flacher, und es zeigen sich die üblichen Schwankungen des Temperaturverlaufes infolge der Turbulenz. Da der Wind nicht nur durch die Luftbewegung allein die Temperaturen herabsetzt, sondern auch durch eine gesteigerte Verdunstung, ist seine Wirkung eine doppelte. Nun ist an den Steilhängen des Krainberges der Wind (Hangwind!) ein Standortscharakteristikum (KRAUS, SCHANDERL [1930]), und so dürfen wir auch hier mit HARDER von der „wohltuenden“ Wirkung des Windes reden, der die Temperaturen der Pflanzen auf diesem so heißen Standort erniedrigt.

3. Die Bedeutung der Profilstellung

Eingehender sollte die Frage nach der Bedeutung der Profilstellung für die Temperatur und den Tagesgang an einem anderen Objekt, der klassischen *Lactuca serriola* = *L. scariola*, geklärt werden (Abb. 3).

Die Versuchspflanzen wuchsen an einem anderen Standort, nämlich am Wegrand vom Bildstöckl zur Station (oberer Weg) dicht vor einer Weinbergsmauer aus Feldsteinen von braungrauer Farbe. Der Boden, an Steinen aller Größen reicher, heller Kalkboden, war fast völlig überzogen mit *Rubus* und verschiedenen Unkräutern, so daß von einer ungehinderten Bodenrückstrahlung kaum gesprochen werden kann.

Zwischen dieser Bodenbedeckung standen einige Exemplare von *Lactuca serriola*, die eine Reihe von Profilblättern verschiedener Orientierung hatten, meist in der bodennahen Region. Davon dienten als Untersuchungsobjekte zunächst zwei NS-Profilblätter („Kompaßstellung“) in 25 und 45 cm Höhe über dem Boden. Ein weiteres Profilblatt, ebenfalls 25 cm hoch, war zwangsweise $\pm$ bodenparallel gestellt worden und dabei so geneigt, daß die mittägliche Sonne die Spreite nahezu senkrecht treffen mußte. Ein letztes Profilblatt stand in NW-SE-Orientierung¹⁾ 30 cm über dem Boden, war aber durch die umgebenden Pflanzen in der Ventilation gegenüber den anderen, frei ausgesetzten Blättern benachteiligt. Die Temperatur der bodennahen Luft wurde in 25 cm Höhe (hinter einem provisorischen Strahlungsschutz) verfolgt. Die Messung von Bodentemperaturen unterblieb aus Mangel an geeigneter Anordnung; sie wäre bei der Bedeckung außerdem wenig sinnvoll gewesen.

Der Tag war nach einem Nebelmorgen bei geringer Bewölkung und ungestörter Einstrahlung sehr heiß; die Lufttemperatur in 200 cm Höhe überschritt am Nachmittag 29°, in 25 cm Höhe wurden 37° erreicht. Auffällig war der Dunst, der den ganzen Tag über beobachtet wurde.

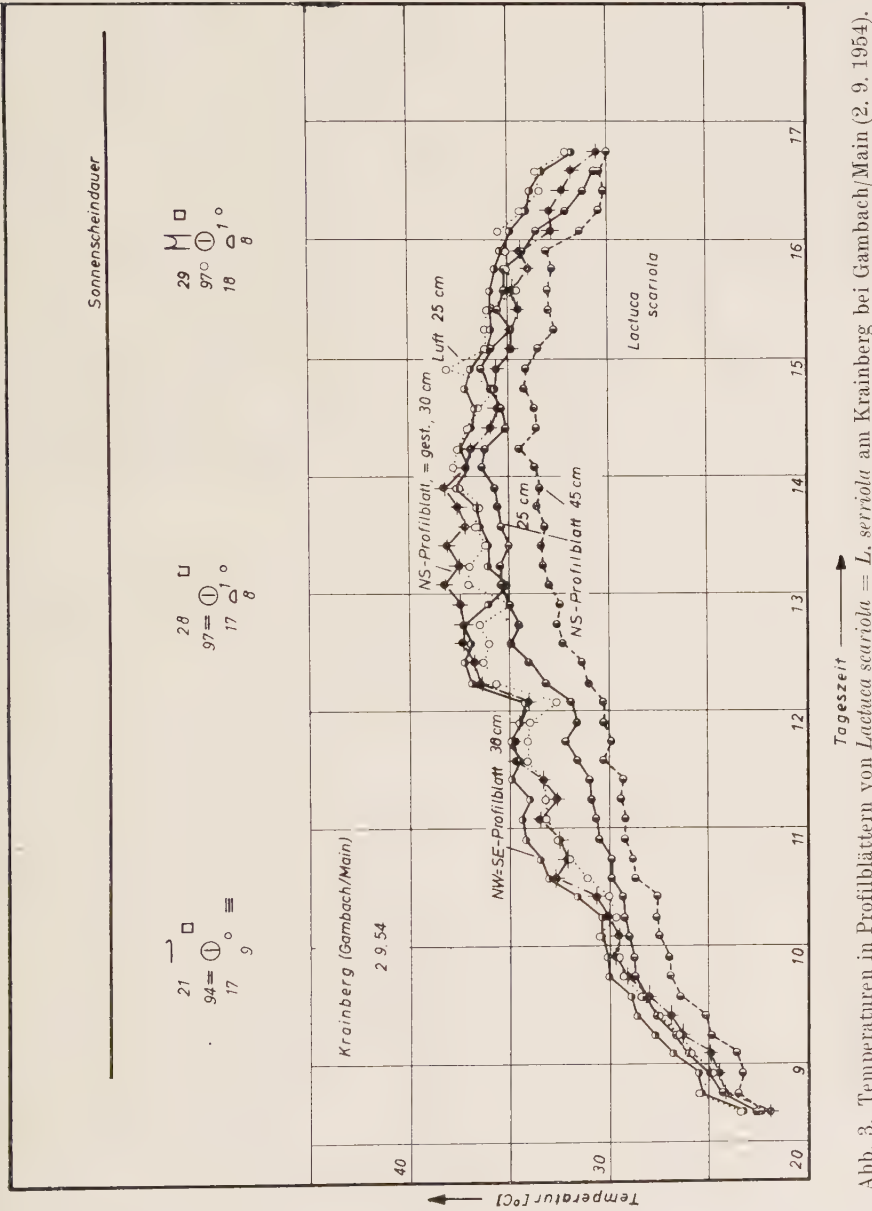
Wiederum zeigen sich die NS-Profilblätter besonders begünstigt, da sie praktisch immer unter der Lufttemperatur liegen, wobei die Differenz (beim Blatt in 25 cm Höhe) bis fast 3° betragen kann (für das Blatt in 45 cm Höhe dürften ähnliche Verhältnisse bestehen, doch konnte hier die Lufttemperatur nicht mitgemessen werden).

Es treten also wiederum Prozesse auf, die eine Untertemperatur der Profilblätter bewirken. Der Strahlungseffekt allein kann es kaum sein; denn in den Morgen- und in den Nachmittagsstunden, wenn die W-E-exponierte Spreite der Einstrahlung durch die niedrig stehende Sonne praktisch voll ausgesetzt ist, zeigt z. B. das untere (25 cm) Profilblatt keine erkennbare Übertemperatur gegenüber der bodennahen Luft.

Ganz anders als diese beiden Blätter in Profilstellung verhält sich das sonst völlig gleich ausgesetzte, aber der Sonnenstrahlung der Mittagsstunde voll exponierte Blatt. Seit 10 Uhr morgens liegen seine Temperaturen bis um 14 Uhr nachmittags über der Temperatur der bodennahen Luft (bis 2,5°)

1) Orientierung: Blattebene in der angegebenen Richtung. Exposition: die Normale auf der Blattfläche in der angegebenen Richtung.

und über der Temperatur der Profilblätter (bis 3°). Erreichen die Profilblätter ihr Tagesmaximum (ihrer W-E-exponierten Spreite wegen) am



Nachmittag mit 36,4° (unteres Blatt) bzw. 34,5° (oberes Blatt), so tritt dieses bei dem zwangsweise bodenparallel gestellten Blatt in der Mittags-

zeit mit 38,3° ein. Es tritt uns also die Profilstellung als doppelt vorteilhaft entgegen: Nicht nur, daß das Temperaturmaximum niedriger ist als bei einem bodenparallel orientierten Blatt, sondern es ist auch in eine Zeit verschoben, da die Intensität der Einstrahlung nicht das Maximum des höchsten Sonnenstandes hat. Doch ist damit der Vorzug der Profilstellung nicht erschöpft. Betrachten wir dazu den Temperaturgang des NW-SE-orientierten Profilblattes. Obwohl es sich in Profilstellung befindet, liegt seine Temperatur entweder gleich der Temperatur der bodennahen Luft (Nachmittag) oder bis zu 1—2° höher (Vormittag). Da dieses Blatt in seiner Exposition nicht wesentlich von den anderen unterschieden ist, kann dieser auffällige Unterschied nur auf die viel schlechtere Ventilation dieses im Blättergewirr stehenden Profilblattes zurückgeführt werden. Die Profilstellung also bedeutet darüber hinaus nicht nur Schutz vor zu großem Strahlungsgenuß, sondern mindestens zugleich auch eine Stellung, die dem Austausch einen geringeren Widerstand entgegensetzt, und damit die Kühlung durch Luftbewegung, viel mehr aber die durch die Transpiration befördert, wie sich im folgenden noch zeigen wird.

4. Die Bedeutung der Konvektion. Hitzeresistenz

Wie sich eine stark behinderte Konvektion (L) auf die Pflanzentemperatur auswirkt, sei an einem dritten Versuch am gleichen Standort und am gleichen Objekt gezeigt (Abb. 4).

Zwei Profilblätter von *Lactuca serriola* in gleicher Höhe, das eine in NS-Orientierung (Kompaßstellung), das zweite in WE-Orientierung (transversale Kompaßstellung), wurden in ihrer natürlichen Stellung belassen. Ein drittes NS-Profilblatt wurde waagrecht gestellt und dabei so geneigt, daß die Sonne der Mittagsstunde $\pm$ senkrecht auf die Spreite treffen mußte. Außerdem war es in einem Glaskolben (KOLLEkolben) eingeschlossen, der Verschuß durch einen gut sitzenden Korken abgedichtet. Ein viertes Blatt wurde gleich dem dritten exponiert, doch war es in einem Kolben eingeschlossen, dessen Boden mit Kameramattlack geschwärzt war. Beide Blätter lagen, um ihre Längsachse gerollt, zum größten Teil im Hals des Kolbens, der für diese Blätter etwas zu lang war.

ROUSCHAL hat mit Hilfe geschwärzter Röhrechen Blätter mediterraner Pflanzen auf ihre Hitzeresistenz geprüft. Gegen den Einschluß in Glasgefäße müssen wegen des gänzlich andersartigen Küvettenklimas schwere Bedenken erhoben werden (s. auch TRANQUILLINI). Mir kam es aber nur auf die Temperatur an, bei welcher existentielle Schädigungen am Blatt auftreten; die Kausalanalyse sollte späteren Versuchen überlassen bleiben.

Nach einem Vormittag mit Nebel und Beschlag setzte erst um die Mittagsstunde die volle Sonnenstrahlung ein. Mit Lufttemperaturen über 25° im Maximum war der Tag noch heiter. (Die Temperatur der bodennahen Luft konnte wegen eines ausgefallenen Thermoelementes leider nicht mitverfolgt werden.)

Nach dem allgemeinen schnellen Temperaturanstieg aller Versuchsobjekte bei voll einsetzender Sonnenstrahlung erwärmt sich das NS-Profilblatt weiter, weil die nachmittägliche Sonne immer mehr die W-exponierte Spreite trifft, wie es schon der vorausgegangene Versuch demonstriert hat. Das WE-Profilblatt hält hingegen seine einmal erreichte Temperatur:

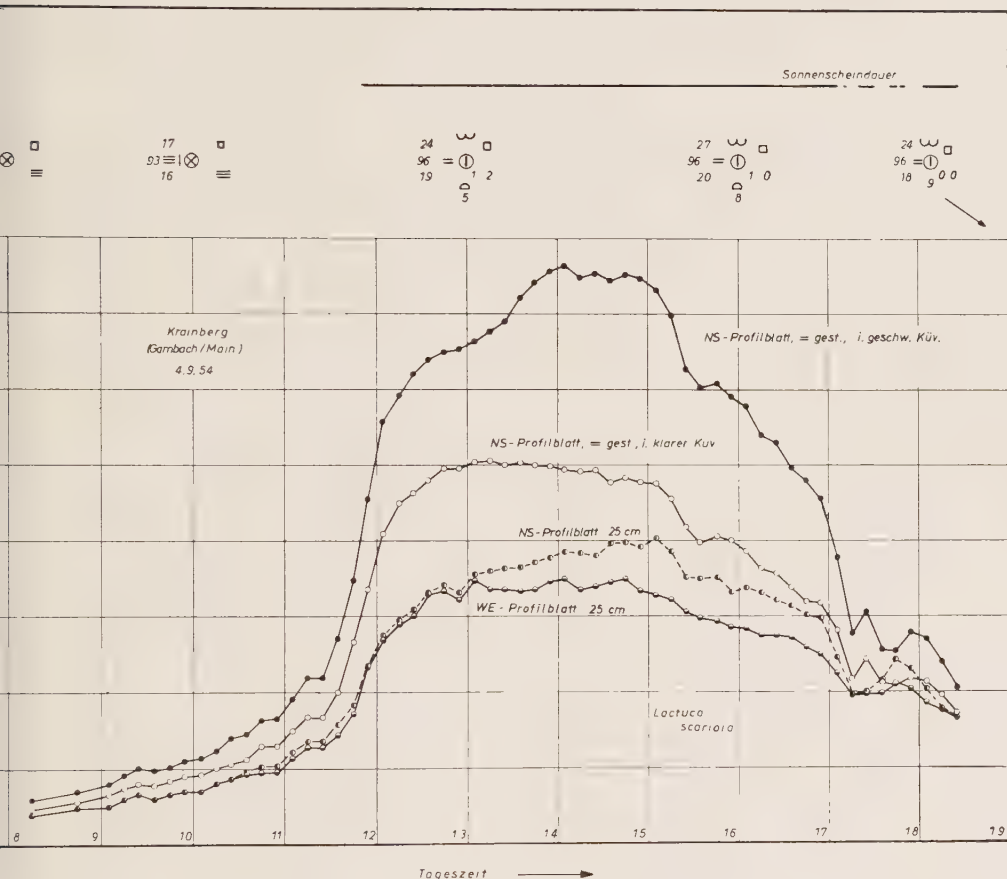


Abb. 4. Temperaturen von frei exponierten und von in Kolben eingeschlossenen Blättern von *Lactuca scariola* = *L. serriola* am Krainberg bei Gambach/Main (4. 9. 1954).

Energiezufuhr und -abgabe halten sich die Waage, obwohl die Sonnenstrahlung während dieser Zeit noch spürbar die S-exponierte Spreite erwärmen müßte.

Gleichsinnig mit der Temperatur des WE-Profilblattes verläuft auch die Temperatur des in klarer Kuvette eingeschlossenen Horizontalblattes: ein Blatt in transversaler Kompaßstellung scheint demnach bezüglich der

Einstrahlung nicht grundsätzlich verschieden von einem waagerecht stehenden zu sein. Anders dagegen verhält es sich mit der Wärmeabgabe durch Konvektion (L) und Transpiration (V).

Diese findet bei frei ausgesetzten Blättern unmittelbar statt, wie der unruhige Temperaturverlauf der beiden frei exponierten Profilblätter zeigt. Bei dem in eine klare Küvette eingeschlossenen Blatt ist sie aber mit völlig anderen Bedingungen an die Außenfläche der Küvette verlegt. Der Wärmestau führt damit zu einem höheren Temperaturniveau im Blatt.

Die schon seit den nebligen Morgenstunden zu beobachtende Übertemperatur gegenüber einem frei ausgesetzten Blatt (WE-Profilblatt) steigert sich auf 8° . Dennoch ist die Maximaltemperatur von 40° , die mehr als eine Stunde lang getragen wird, keineswegs tödlich, denn wir beobachteten im ersten Versuch bei *Lactuca perennis* bei freier Konvektion und Transpiration nahezu gleich hohe Temperaturen.

Das Blatt blieb noch 4 Tage in seinem gläsernen Gefängnis. Obwohl am dritten Tage eine geschwärzte Schieferplatte untergelegt wurde, zeigten sich erst am vierten Tage Verfärbungen und Welkungserscheinungen. Aus der Küvette befreit, war das Blatt ein schlappes Gebilde.

Ganz im Gegensatz dazu verdorrte das in gleicher Exposition, aber in der halbgeschwärzten Küvette befindliche Horizontalblatt schon binnen kurzer Zeit nach einsetzender Sonnenstrahlung zu einem trockenen, brüchigen Etwas. Um 13 Uhr zeigten sich an der Blattspitze die ersten Vergilbungen. Die nochmalige Temperatursteigerung, die nach 13 Uhr die Temperatur bis auf 53° hinaufklettern läßt, und die sich in den anderen Versuchsobjekten nicht nachweisen läßt, ist darum wohl nicht mehr die Temperatur eines lebenden Blattes, sondern die einer Blattleiche. Das bedeutet, daß eine Temperatur von mehr als 45° (bis zu dieser Höhe darf die Kurve noch als die Temperatur des lebenden Blattes gedeutet werden) letal wird, wenn die Wärmeabgabe durch Konvektion und durch Transpiration auf ein unnatürliches Minimum herabgedrückt ist. (Der analoge, für ein Profilblatt in gleichem Gefäß geltende Versuch unterblieb infolge der ungünstigen Witterung.)

Zum Schluß sei noch folgendes — qualitativ — mitgeteilt: An zwei Tagen wurde ein Blatt von *Lactuca serricola* in bodenparalleler Lage in ein Glasgefäß (KOLLE-Kolben) eingeschlossen, das gegen die Globalstrahlung durch einen weißen Lacküberzug abgeschirmt war. Eine Erwärmung durch Strahlung mußte also vor allem durch die Unterlage (Bodenrückstrahlung) erfolgen, deren Wirkung durch eine untergelegte geschwärzte Schieferplatte verstärkt wurde. Die in den nicht weiter auswertbaren Registrierungen erkennbare Übertemperatur gegenüber einem strahlungsexponierten frei

ausgesetzten Blatt ist gering; sie rührt wohl vorwiegend aus dem gehemmten Austausch her. Eine merkliche Temperatursteigerung durch die „Bodenrückstrahlung“ muß daher ausgeschlossen werden (SCHANDERL [1930 und 1932] führt ja die Profilstellung auf die „Bodenrückstrahlung“ zurück. Siehe dazu auch die Untersuchungen in Sizilien an *Opuntia* S. 525ff).

B. Die Untersuchungen im mediterranen Raum auf dem Monte Pellegrino bei Palermo

Vorbemerkung

Die Untersuchungen sollten zunächst an einem Ort (Monte Pellegrino), der mir durch die freundliche Unterstützung der sizilianischen Forstverwaltung zugewiesen war, begonnen, später — bei besserer Kenntnis des Landes — an einem zweiten Standort im Inneren der Insel wiederholt werden, um so zu einer allgemeineren Aussage über die mikroklimatischen Verhältnisse und die vorkommenden Pflanzentemperaturen zu gelangen.

Wegen Transportschadens am 6-Farben-Schreiber und seiner behelfsmäßigen Reparatur mußte ich mich darauf beschränken, auf dem Monte Pellegrino die mikroklimatischen Verhältnisse und die Temperaturen der Pflanzen auf die verschiedenste Weise aufzuklären.

1. Allgemeines über Lage, Klima, Boden und Flora

Der Monte Pellegrino (600 m) springt als ein mächtiger Kalkklotz am Nordwestende der Bucht von Palermo in das Meer vor. Steil stürzt er nach allen vier Seiten ab, ist oben dagegen (vom Hauptgipfel abgesehen) nur schwach gewellt. Die geschlossene Grasvegetation, die von vereinzelt oder in kleineren Gruppen stehenden Ginster, Opuntien und Steineichen durchsetzt wird, ist bis vor kurzem als Schafweide genutzt worden. In den letzten drei Jahrzehnten aber wurde der Berg durch das „rimboschimento“ des sizilianischen Corpo forestale an einigen Stellen mit *Eucalyptus* und *Pinus* wieder aufgeforstet.

Diese augenblicklich dort weitergetriebene Aufforstung mit *Eucalyptus* und *Pinus* geschieht durch Jungpflanzen, die an Ort und Stelle vorgeschult werden. Sie werden in hangparallelen Reihen (gradoni) oder in Einzelpflanzungen (bucchi) ausgesetzt. Die angepflanzten Bäumchen sollen in den ersten 2—3 Jahren gut fortkommen; dann allerdings gehen viele von ihnen ein. So habe ich zahllose vertrocknete Exemplare beobachten können (s. dazu PAVARI, DE PHILIPPIS).

Diese Pionierarbeit wird geleistet gegen die Eigenart des mediterranen Klimas mit seiner sommerlichen Dürrezeit (s. Klimadiagramm S. 515). Denn die recht ansehnlichen Jahresniederschläge von 749 mm (ALT) fallen vornehmlich in den Herbst- und Wintermonaten. Die Sommer sind dagegen wolkenarm (Bewölkung 1—3) und heiter, die kaum gestörte Einstrahlung erwärmt den Boden nachhaltig und läßt die Lufttemperaturen hoch an-

steigen. So liegt denn über dem Gelände ein hochreichender, zitternder Glast, und die Straßenspiegelung ist eine alltägliche Erscheinung.

Die Messungen wurden im Wiederaufforstungsbezirk, und zwar in unmittelbarer Nähe des Rifugio forestale (etwa 500 m nördlich des Santuario di Santa Rosalia an der Straße zur Statua di Santa Rosalia) in 425 m Seehöhe während der Zeit vom 21. 6. bis 20. 8. 1955 durchgeführt, also in der Zeit der extremsten Bedingungen.

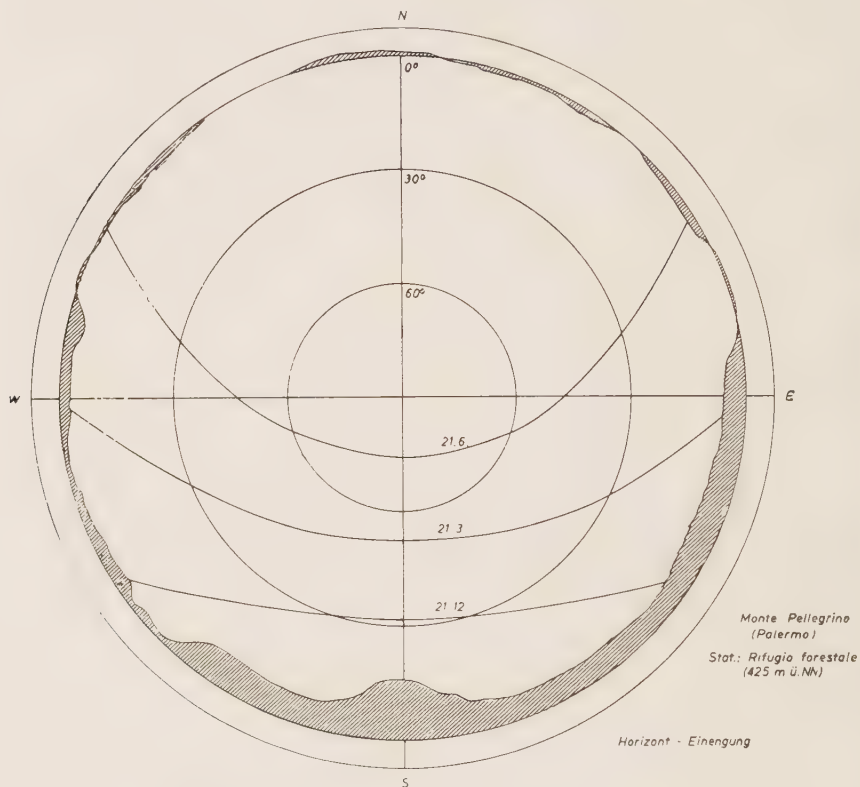


Abb. 5. Horizonteinkung für den Standort auf dem Monte Pellegrino bei Palermo (vgl. dazu LAUSCHER).

Der Boden im Versuchsgelände war von mittelbrauner Farbe mit leicht rötlichem Einschlag. Die verdorrten Reste der Vegetation bildeten einen nur schwach humifizierten, sonst oberflächlichen dichten Filz. In den von Pflanzenwuchs freigehaltenen bucci und gradoni zeigte sich der Boden an der Oberfläche als eine krümelige trockenharte Materie, etwas tiefer dann von größerer Konsistenz. Er enthielt wenig Steine, die dann aber doch recht groß waren. Beim Graben stieß man — bald früher, bald später — auf das Grundgestein, das zudem in unzähligen Brocken von bizarren Verwitterungsformen das ganze Gelände durchsetzte.

Wie aus der Darstellung der Horizonteinengung (Abb. 5) erkennbar ist, war die Einstrahlung praktisch nicht eingeschränkt; da die hochstehende Sonne zudem auf eine horizontale Fläche fiel, durfte ich hier schon mit recht extremen Werten rechnen. Nicht zu umgehen war die exponierte Lage, die die Besonderheiten einer Bergstation und einer Küstenstation zugleich in sich barg. Diese Lage ist bei den folgenden Betrachtungen zu berücksichtigen.

Vorweg einige Einzelangaben zu klimatischen Größen:

Unter 47 Beobachtungstagen sind allein 18 Tage, an denen die Einstrahlung völlig ungestört war. Sie erreichte mit rund $1,14 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ in der Mittagszeit ihren höchsten Wert; er konnte noch — um ein geringes — überschritten werden, wenn durch Reflexion an Wolken in der Mittagsstunde die Einstrahlung vorübergehend stärker wurde.

Die Lufttemperaturen in 200 cm Höhe waren für mitteleuropäische Verhältnisse sehr ansehnlich. So konnten unter 42 Beobachtungstagen 20 Sommertage (das Tagesmaximum überschreitet 25° C) und 12 Hitzetage (das Tagesmaximum überschreitet 30° C) beobachtet werden. Die tägliche Schwankung zwischen Maximum und Minimum lag in der Regel zwischen 8 und 10° C .

Über die vorherrschenden Windrichtungen lassen sich keine verbindlichen Angaben machen, da die zahlreichen Windbeobachtungen vorwiegend aus den Tagesstunden stammen (Tabelle 1). Faßt man jedoch die wenigen, über jeweils 24 Stunden laufenden Beobachtungen zusammen (Tabelle 2), dann treten hierin auch die S- und SW-Richtungen etwas stärker hervor (also Landwinde; von einem ausgeprägten Land-See-Windsystem kann anhand des dünnen Beobachtungsmaterials und auf Grund der Lage (Höhe) des Standortes nicht gesprochen werden), ohne aber die dominierenden W-, NE-, E- und SE-Richtungen, die in allen Beobachtungen vorherrschen, abzuschwächen.

Tabelle 1

(Alle Windbeobachtungen)								in %
N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	C
10	12	20	16	4	6	24	8	6

Tabelle 2

(24stündige Windbeobachtungen)								in %
N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	C
5	13	17	16	10	9	25	5	6

2. Die Feuchtigkeitsverhältnisse

An zahlreichen Tagen — und auch in mehreren Nächten — wurden relative Luftfeuchtigkeit und Dampfdruck über dem Boden in 15 cm und in 200 cm Höhe mit ASSMANNschen Aspirationspsychrometern halbstündlich bestimmt, um Einblick in Gefälle und täglichen Gang zu bekommen. Die gefundenen Tagesgänge lassen eine gemeinsame Gesetzmäßigkeit für den exponierten Standort kaum erkennen,

Die relative Luftfeuchtigkeit kann in der heißen und trockenen Zeit sehr niedrig werden; so wurden sogar in Nachtstunden 12—20 % und 30—35 % beobachtet, was sich anhand der Windrichtungen unschwer auf den Einfluß eines aus dem Landinneren wehenden trockenen Windes bzw. den Einbruch trockenwarmer Luftmassen durch Scirocco (ital.: Südwind) zurückführen läßt. Das Gefälle der relativen Luftfeuchtigkeit (15—200 cm) entspricht dem von GEIGER beschriebenen Normaltyp: in den Nachtstunden ist es in Bodennähe feuchter, tagsüber trockener.

Der Dampfdruck (als ein eindeutiges Maß für den Wasserdampfgehalt der Luft) läßt eine solche Gesetzmäßigkeit nicht mehr erkennen. Er folgt nur auffällig dem Winde nach Richtung und Stärke. Demnach wird der Wasserdampfgehalt der Luft nicht durch die Unterlage, d. h. den Boden und seine Verdunstung bestimmt, sondern vorwiegend durch Advektion. Denn der Boden, der während 4—6 Wochen¹⁾ keine nennenswerten Mengen Wasser erhalten hat, wohingegen er in dieser Zeit der stärksten Erwärmung ausgesetzt war, kann keine merkliche Verdunstung haben. So nimmt denn auch mit Andauer der heißen Periode das Dampfdruckgefälle (Tabelle 3;

Tabelle 3
(Dampfdruckgefälle)

Tag	Gefälle (cm)	Betrag (Torr)	Wind
5. 7.	100/200	— 1,7	W
10. 7.		— 0,5	NE
11. 7.		— 1,0	E
13. 7.		— 0,2	E
14. 7.		— 0,4	NNE
19. 7.	15/200	— 0,3	NW
22. 7.		+ 0,7	W — N — NE
23. 7.		+ 0,1	W
25. 7.		+ 0,1	E — S — SW
31. 7.		— 0,3	E/NE
5. 8.		+ 0,2	WNW
15. 8.		— 0,6	NW — N — E
16. 8.		— 0,9	W
19. 8.		— 1,1	NE

1) Der letzte größere Regen fiel am 31. 5. An zwei späteren Tagen (10. 6. und 8. 7.) kamen einzelne Tropfen. Nicht mit Sicherheit kann angegeben werden, ob es auch in der Nacht auf den 22. 6. geregnet oder geträpelt hat, ebenso in der Nacht auf den 12. 7. Von diesem Zeitpunkt an fiel nachweislich kein Regen mehr bis zur Nacht auf den 6. 8. (von einigen Tropfen eines vorüberziehenden Gewitters am 2. 8. abgesehen). Dann folgte am 14. 8. ein kurzer Regen, am 15. 8. ein Regen geringer Ergiebigkeit und Gewitter, am 19. 8. ein Nachtgewitter (und bei meiner Abreise am 24. 8. stärkerer Regen über eine längere Zeitspanne hinweg).

Mittelwert von 10 bis 14 Uhr, der Zeit der größten Einstrahlung und stärksten Erwärmung der Bodenoberfläche) soweit ab, bis es praktisch verschwindet. Im Gegenteil, es scheint sich eine Tendenz einzustellen, das

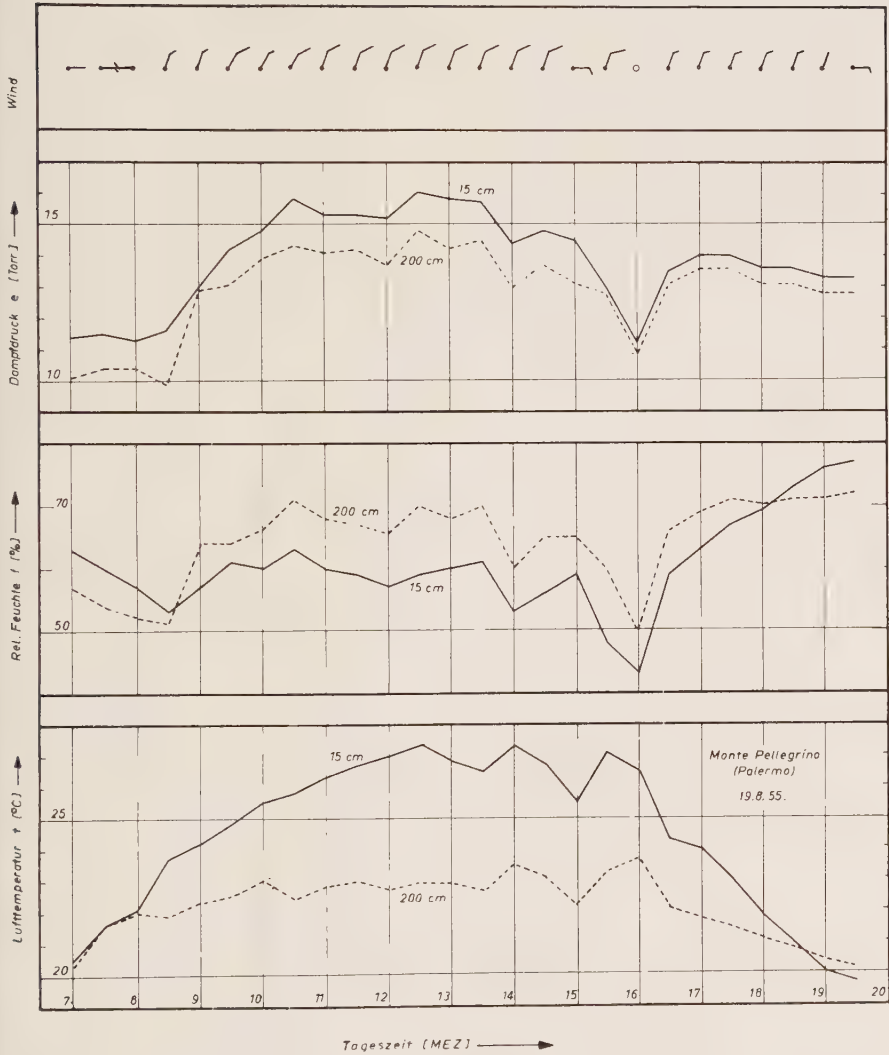


Abb. 6. Tagesgang von Dampfdruck e und relativer Luftfeuchtigkeit f in 15 und 200 cm Höhe über dem Boden nach den ersten Regenfällen am Ende der Dürrezeit auf dem Monte Pellegrino bei Palermo (19. 8. 1955).

Gefälle umzukehren (vgl. HUBER 1947). Das kann aber nur geschehen, wenn der Wasserdampf advektiv herangeführt wird. Erst mit Einsetzen der

ersten Regenfälle am 14. 8. und ff. nimmt das Gefälle wieder zu: jetzt kann der Boden wieder verdunsten.

Am 19. 8. (Abb. 6), einem Tage also, wo der Boden wieder etwas mit Wasser versorgt war (dazu noch in der Nacht Gewitter!), ist ein deutliches Gefälle (etwa 1—1,5 Torr) zwischen der Luft in 15 und in 200 cm Höhe zu erkennen, das in den Abendstunden auf 0,4 Torr abgenommen hat. Das allgemeine Ansteigen des Dampfdruckes seit den

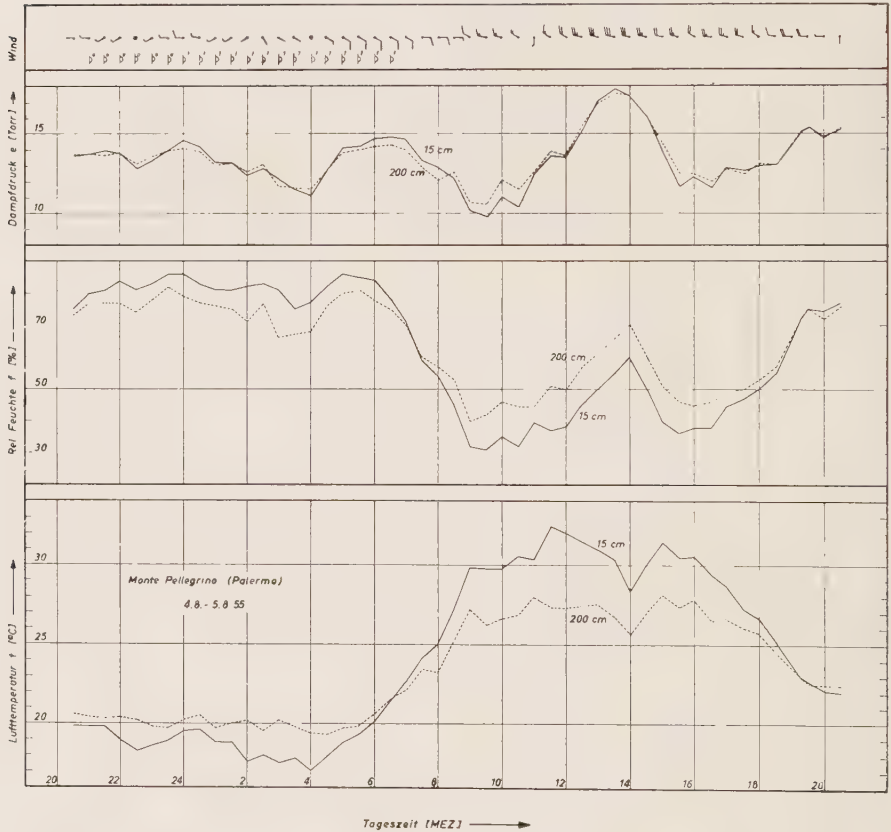


Abb. 7. Tagesgang von Dampfdruck e und relativer Luftfeuchtigkeit f in 15 und in 200 cm Höhe über dem Boden während der Dürrezeit auf dem Monte Pellegrino bei Palermo (4./5. 8. 1955).

frühen Vormittagsstunden dagegen ist weniger der zunehmenden Erwärmung des Bodens und damit der zunehmenden Verdunstung zuzuschreiben als einem über den ganzen Tag hinweg gleichmäßig nach Richtung und Stärke wehenden Wind vom Meer her. Das geht hervor aus dem vorübergehenden starken Rückgang um 16 Uhr, der bei Lufruhe erfolgt.

Noch deutlicher wird der advective Herantransport von Wasserdampf in der Darstellung vom 5. 8. (Abb. 7), aus einer Zeit gegen Ende der trockenheißen Periode. Das Dampfdruckgefälle ist durchwegs viel geringer als am 19. 8. (etwa 0,5 Torr);

außerdem kommen positive Gradienten vor. Das dreimalige Ansteigen des Dampfdruckes (um 24 Uhr, nach 4 Uhr und nach 10 Uhr) ist jedesmal mit einer Luftbewegung aus Richtung des Meeres verbunden, ganz besonders demonstriert im dritten Anstieg: mit zunehmender Einstrahlung hatte der Wasserdampfgehalt am Boden soweit abgenommen, daß sich positive Gradienten eingestellt hatten. Dann setzt aber mit starkem Wind (Beaufort 6) ein massives Ansteigen des Dampfdruckes ein, und ein Gradient wird durch die dynamische Turbulenz völlig verwischt.

Diese Messungen mit unzulänglichen Mitteln sind nur als ein erster Einblick gedacht. Doch werden sie bestätigt durch die folgenden Beobachtungen:

Schon vor meinem Eintreffen am 31. 5. war die Grasvegetation gelb geworden und verdorrte in kurzer Zeit völlig. Nur die tiefwurzelnden Disteln und die Opuntien überdauerten die Dürrezeit. So müssen wohl die vielen Jungpflanzen von Eucalyptus deshalb eingehen, weil ihr Wurzelsystem noch nicht genügend entwickelt ist, um den großen Wasserbedarf dieser Gattung zu decken und damit die Organtemperatur durch Transpiration unter die letale Grenze zu senken.

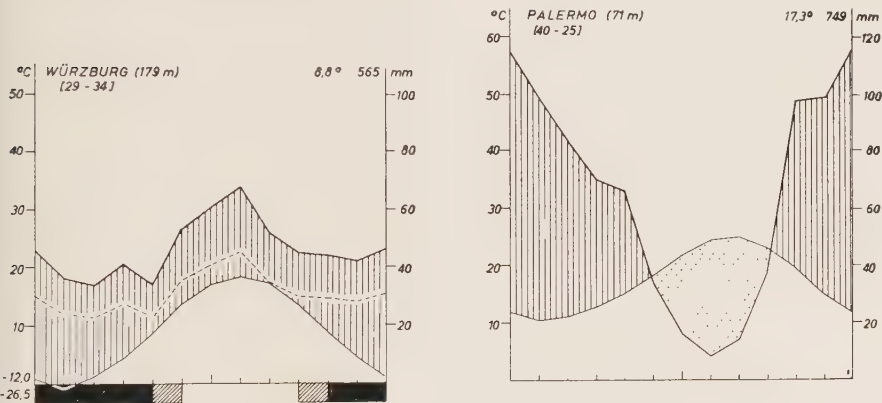


Abb. 8. Klimadiagramme von Würzburg und Palermo (näheres s. bei WALTER, Ber. dtsch. bot. Ges. 68, 1955).

In dem kleinen Vorgärtchen des Rifugio forestale wurden Margueriten, Begonien, Geranien, Rosen und ähnliche Gartenpflanzen kultiviert. Sie wuchsen unter der gleichen Sonne wie die verdorrten Gräser und welkenden Eryngien. Daß sie dennoch die Dürrezeit recht gut und sogar blühend überstanden, ist dem täglichen Wässern durch die Arbeiter des Forstdienstes zuzuschreiben, unter denen ein Liebhaber sogar mehrfach mit Erfolg Rosen okulierte.

Unter natürlichen Bedingungen geht daher die Mehrzahl der Pflanzen in der heißen und trockenen Zeit in eine Ruheperiode über, ausgenommen diejenigen, die auf Grund ihrer morphologischen oder physiologischen Fähigkeiten in der Lage sind, das lebenswichtige Wasser zu beschaffen, zu speichern oder sparsam zu verwalten. Hierin aber unterscheiden sich die Standorte der deutschen Trockengebiete von den sizilianischen (vgl. Klimadiagramm Abb. 8). Denn in Sizilien steht — außerhalb der Dürreperiode — das Wasser ausreichend zur Verfügung; in den deutschen Trockengebieten

aber verteilt sich der im Vergleich zu den Regenmengen in Sizilien geringere Jahresniederschlag nahezu gleichmäßig über das Jahr. Wenn daher eine eigentliche Dürrezeit fehlt, so kann doch — je nach Unterlage und jährlicher Niederschlagsschwankung — das Wasser jederzeit knapp werden (vgl. im Klimadiagramm für Würzburg die gestrichelte Niederschlagskurve [$\frac{2}{3}$ Maßstabsteilung]; näheres bei WALTER). Auf diesen Standorten können also nur Pflanzen existieren, die einem permanenten Wasserdefizit gewachsen sind und die auch die Folge der trockenen Unterlage (die hohen Lufttemperaturen) ertragen können.

3. Die Bodentemperaturen (Abb. 9)

Die Temperatur der waagerechten, unbewachsenen Bodenoberfläche wurde bei jeder Registrierung gemessen, da von ihr im wesentlichen das Mikroklima des Standorts bestimmt wird. Zu diesem Zweck wurde eine Thermonadel auf offenem Boden federnd so an ein Krümelchen der Bodenoberfläche angelegt, daß die aktive Lötstelle durch die überstehende Kanülenspitze gegen Strahlung abgeschirmt war. Die Nadel selber lag in ihrer ganzen Länge auf dem Boden auf; sie durfte daher als gleich temperiert mit der Oberfläche angesehen werden.

Die Bodentemperaturen in geringen Tiefen wurden dagegen nur in einem Versuch gemessen. Die Wiederholung zu einer anderen Zeit — der Vollständigkeit halber — mußte aus Zeit- und Krätemangel unterbleiben. Dabei wurden die Thermoelemente in 2 und 10 cm Tiefe — untereinander liegend — in passende Bodenpartikelchen eingestochen, der Boden bis zur Meßhöhe wieder aufgefüllt. (Günstigster Versuchstag: 25./26. 6. 1955; s. Abb. 9.)

Die Temperaturen in größeren Tiefen konnten leider nicht erfaßt werden. Es sei daher auf die Angaben PAVARIS verwiesen, der in den Jahren 1925 und 1926 mit Maximumthermometern in 30 und 60 cm Tiefe beachtlich hohe Temperaturen gefunden hatte (bis 33°). (Einen gewissen Anhalt geben auch die in 35 cm Tiefe abgelesenen Bezugstemperaturen, die 27° niemals wesentlich überschritten.)

Die höchsten Temperaturen der waagerechten, unbewachsenen Bodenoberfläche schwanken in der heißen und trockenen Jahreszeit bei einer Einstrahlung von rund $1,14 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ — trotz der exponierten Lage des Standortes — zwischen 60 und 70° .

Die Tautochronendarstellung (Abb. 9) für den Versuchstag gibt Einblick in die Temperaturschichtung beiderseits der Bodenoberfläche. Es fällt sofort das große Temperaturgefälle zwischen Bodenoberfläche und Luft in 10 cm Höhe auf, das einer (linearen) Temperaturabnahme von $2,8^{\circ}/\text{cm}$ entspricht. Es findet sich in dieser Größenordnung auch an Tagen mit weit extremeren Verhältnissen als an diesem noch keineswegs außergewöhnlichen Tage; wir werden daher diese aus den Tautochronen erkennbare Schichtung auch an jenen Tagen voraussetzen müssen.

Nun dient bei der großen Trockenheit des Bodens die zugestrahlte Energie praktisch vollständig der Erwärmung (vgl. BAUMGARTNER, HOF-

MANN [1956]). Es wird daher auf den xerothermen Standorten (mit ihrem meist spärlich bewachsenen Boden) eine sehr heiße Luftschicht verständlich, die sich unmittelbar über der Bodenoberfläche ausbildet und die mehr oder weniger hoch hinaufreichen kann. Der zitternde Glask über solchen Gegenden

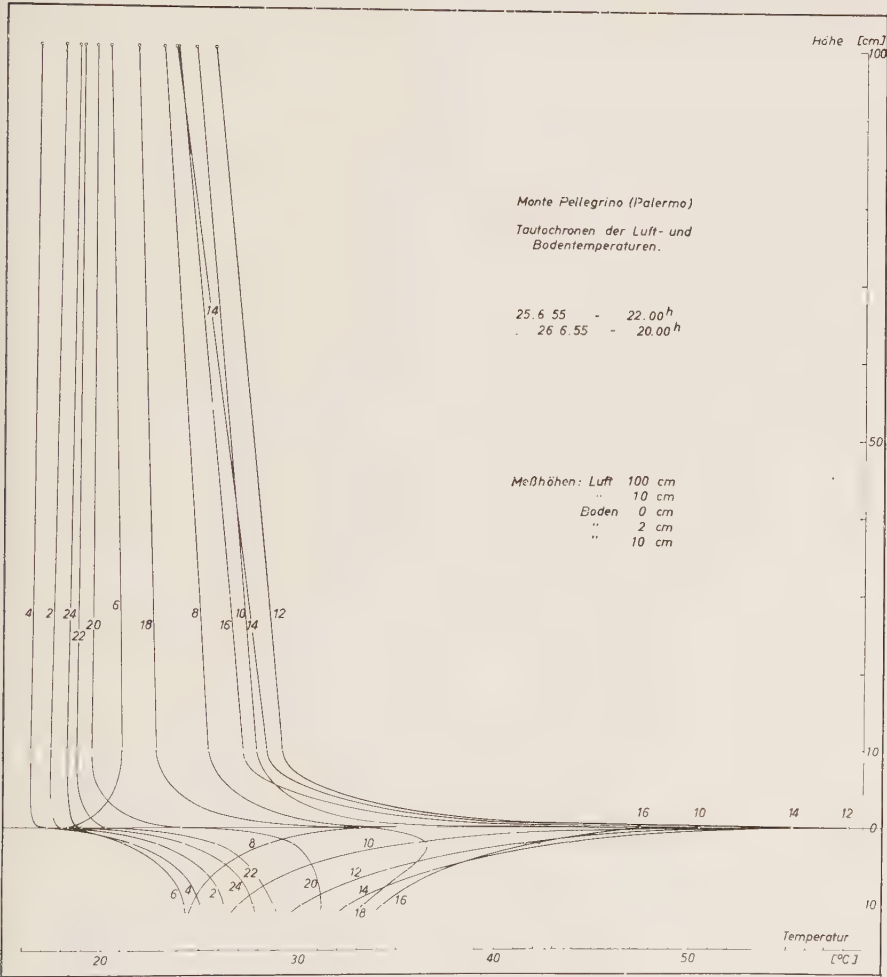


Abb. 9. Tautochronen der Luft- und Bodentemperaturen am 25./26. 6. 1955 auf dem Monte Pellegrino bei Palermo. (Die Zahlen an den Kurven geben die Tageszeit an.)

zeigt sie — indirekt — an. Zusammen mit dem Wassermangel des Bodens bestimmt sie auch die Temperaturverhältnisse in der Pflanze, wie im folgenden gezeigt werden wird.

Merkwürdigerweise können nach diesen Junibeobachtungen die Temperaturen der Bodenoberfläche in den Nachtstunden über denen der bodennahen Luft (hier in

10 cm) liegen¹⁾. Diese Erscheinung ist — in stärkerer Ausprägung — bisher nur aus dem indischen Klimagebiet (ATMANATHAN, RAMDAS) beschrieben worden, kommt aber (nach mündlicher Information) auch in Südamerika vor. RASCHKE hat (ebenfalls nach mündlicher Mitteilung) dazu nähere Untersuchungen angestellt.

4. Flachspresse von *Opuntia ficus indica* in Profilstellung

a) Die Temperaturverteilung innerhalb eines Flachspresses in Profilstellung

Das Charakteristische der Profilstellung zeige die Temperaturverteilung in einem rund $\frac{3}{4}$ cm dicken Flachsproß (Orientierung etwa NW-SE) wenige Zentimeter über unbedecktem Boden am 13./14. 7. (vgl. dazu Abb. 10).

Dieser hier beschriebene Temperaturverlauf gilt nur für eine $\pm$ N-S-Orientierung. Ausführlich wird über die Orientierung im allgemeinen weiter unten (Abschnitt c) berichtet.

Bei wolkenlosem Himmel läßt die ungestörte Einstrahlung die Temperatur der Bodenoberfläche auf fast 67° ansteigen. Die Luft in 200 cm Höhe ist 7 Stunden lang wärmer als 25° (Maximum 29°); der Wind weht in leichter Brise einheitlich aus nord-östlicher Richtung, in den Nachmittagsstunden nur unwesentlich verstärkt.

Die bodennahe Luftschicht (in 15 cm Höhe mit dem Assmann halbstündlich gemessen) überschreitet für fast 6 Stunden 30° (maximal 32°). Das bedeutet bei der hohen Temperatur der Bodenoberfläche ein Temperaturgefälle (0...15 cm) von rund $2,7^\circ/\text{cm}$, also eine sehr heiße bodennächste Lufthaut. Die Bedingungen sind mithin sehr extrem und lassen hohe Organtemperaturen erwarten.

4,5 cm über dem Boden wurde in den Flachsproß je ein Thermoelement unmittelbar unter die Epidermis auf jeder Seite in ganzer Länge der Nadel eingeschoben. Zwischen beiden wurde ein drittes eingeführt, das die Temperatur des Sproßinneren ermitteln sollte. Ein viertes Element verfolgte ebenfalls die Temperatur des Sproßinneren, doch in 6,5 cm über dem Boden.

Der Temperaturverlauf in seiner Gesamtheit ist eine unsymmetrische, zweigipflige Kurve. Ein erstes, kleineres Maximum liegt in den Vormittagsstunden, gegen 9 Uhr, das zweite, erheblich stärker ausgeprägte, wird in den Nachmittagsstunden gegen 15 Uhr erreicht. Das zwischen beiden liegende Minimum ist nur schwach durch ein leichtes Absinken der Temperatur gekennzeichnet.

Das erste Maximum am Vormittag wird fast ausschließlich durch den Energiegewinn aus der Einstrahlung bestimmt. Die noch tief stehende Sonne trifft die NE-exponierte Sproßseite nahezu senkrecht und läßt die Temperaturen zunächst rapide hochklettern. Zwar ist schon nach 1,5 Std. im wesentlichen die Höhe des vormittäglichen Maximums erreicht (hier 37°). Aber der anfänglich steile Anstieg ist sehr bald flacher geworden, denn

1) Außer am 25./26. 6. beobachtet am: 21./22. 6.; 26./27. 6.; 24./25. 6.; 10./11. 8. (in 1,5 cm Höhe). — Isothermie u. a. beobachtet am: 22./23. 6.; 23./24. 6.; 7./8. 7.; 8./9. 8.

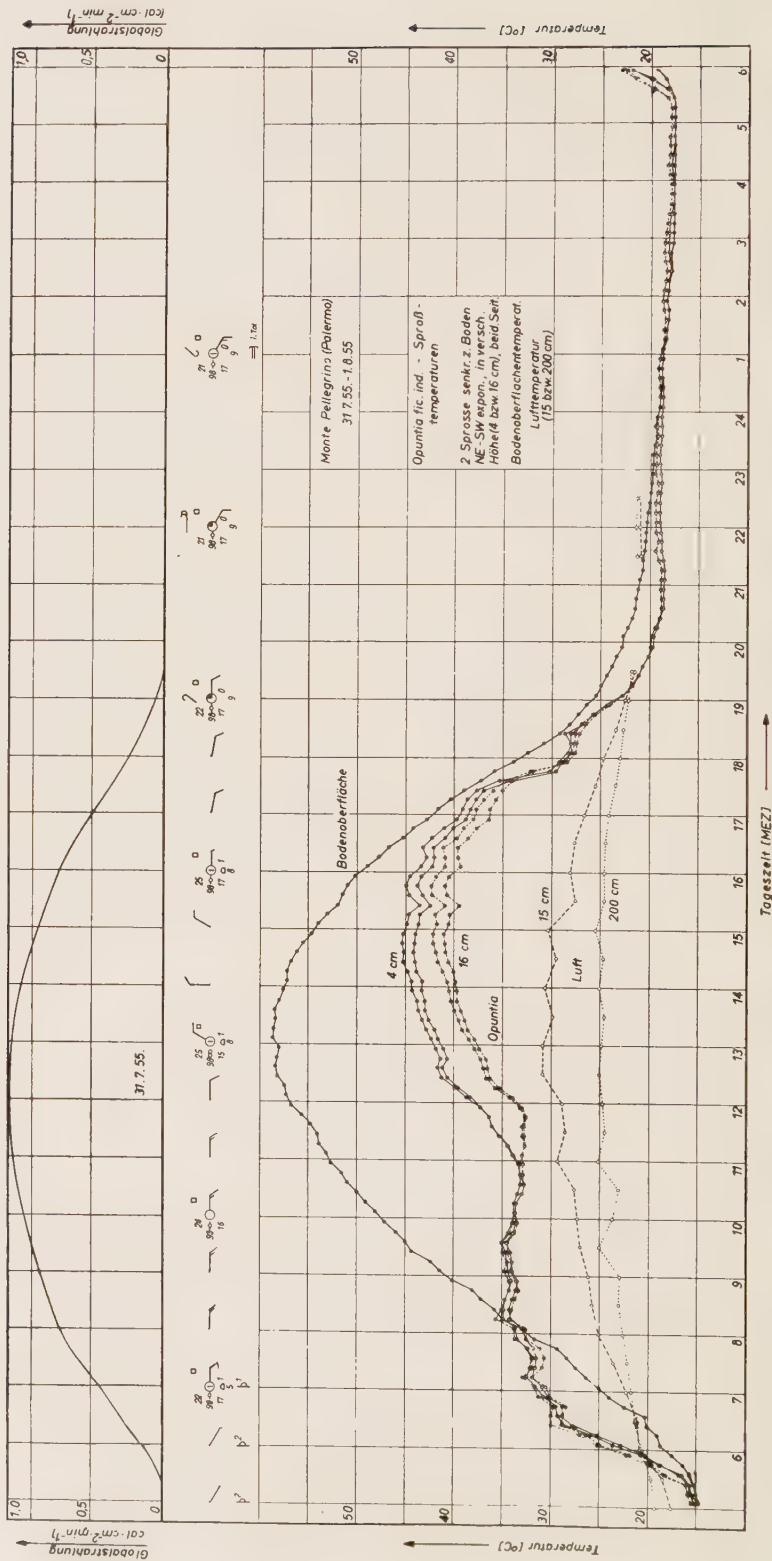


Abb. 10. Tagesgang der Temperatur und Temperaturverteilung in zwei Flachsprossen von *Opuntia ficus indica* in $\pm$ N-S-Profilstellung in 4 bzw. 16 cm über dem Boden (31. 8. 1955 auf dem Monte Pellegrino bei Palermo).

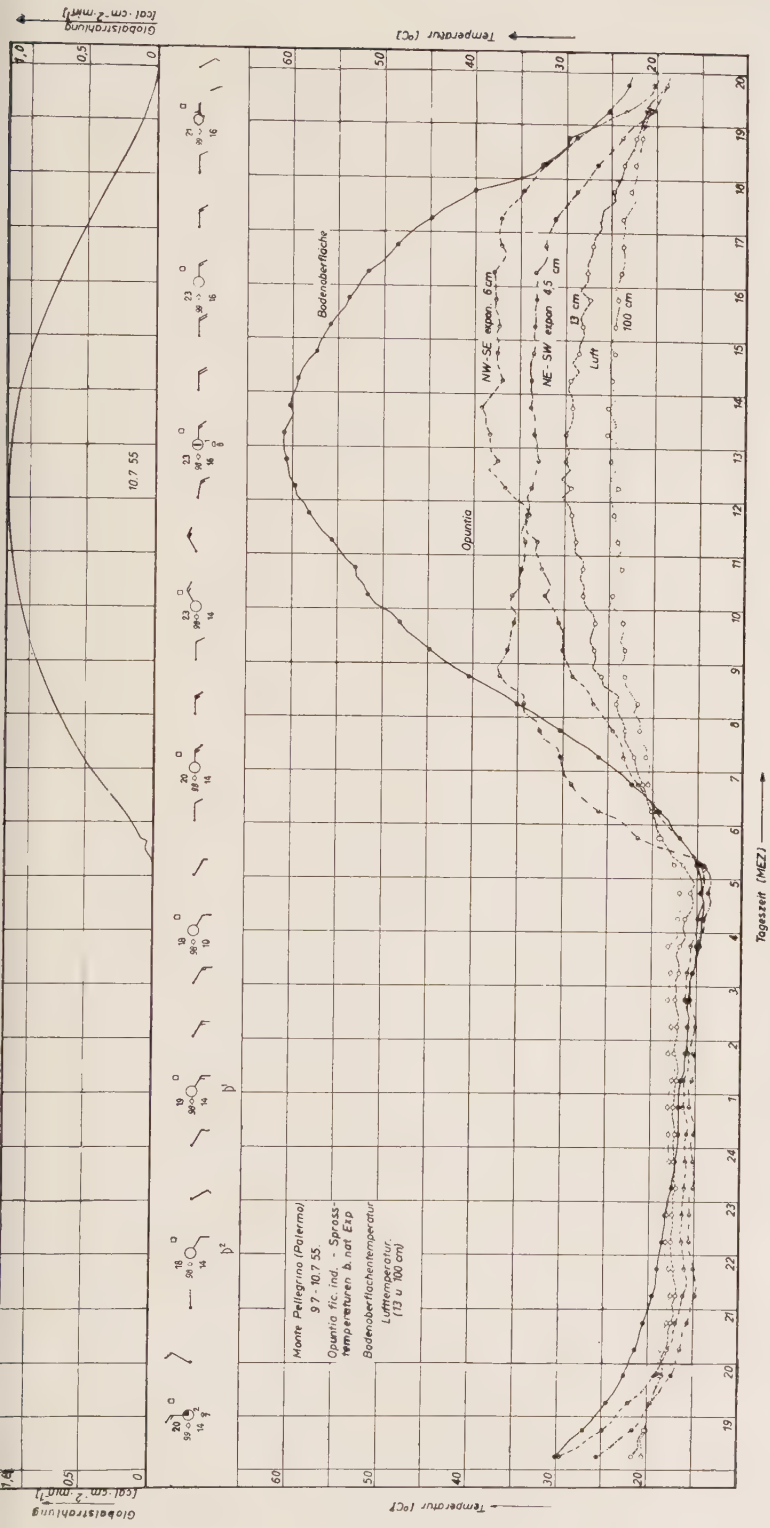


Abb. 11. Tagesgang der Temperatur in zwei Flächprossen von *Opuntia ficus indica* in Profilstellung verschiedener Orientierung 4—6 cm über dem Boden (10. 7. 1955 auf dem Monte Pellegrino bei Palermo).

mit steigender Sonne wird der Einfallswinkel zunehmend kleiner, die Einstrahlung daher schnell geringer.

Zwischen bestrahlter und unbestrahlter Seite sind im ersten, steilen Teil des Temperaturanstiegs Differenzen bis zu 1° zu erkennen, und die Temperatur des Sproßinneren in dieser Höhe zeigt, daß ein Temperaturgefälle durch das Innere hindurch besteht. Im zweiten, flacheren Teil des Temperaturanstiegs ist dieses Gefälle auf $0,7\text{--}0,5^\circ$ abgesunken; daß jetzt aber das Sproßinnere mit der unbestrahlten Seite gleich temperiert ist, erstaunt. Denn wir möchten doch annehmen, daß der Wärmedurchgang von der bestrahlten zur unbestrahlten Seite weiter durch das Sproßinnere erfolgen muß, folglich eine Temperaturdifferenz zwischen Innerem und unbestrahltem Äußeren vorhanden sein müßte. Da dieses anscheinend nicht der Fall ist (oder nur so klein, daß es in der Meßanordnung nicht hervortritt), muß demnach die unbestrahlte Seite einen Energiegewinn haben, der das Temperaturgefälle zwischen ihr und dem Inneren ausgleicht. Dieser Energiegewinn dürfte kaum aus der Himmelsstrahlung auf die unbestrahlte Seite herrühren, sondern kommt von der sich erheizenden bodennahen Luftschicht, in der sich der nur 4,5 cm hohe Sproßteil befindet. (Die in 15 cm gemessene Lufttemperatur kann für die Höhe von 4,5 cm nicht mehr repräsentativ sein.)

Denn diese bodennächste heiße Luftschicht bestimmt zur Zeit des mittäglichen Minimums Temperaturverlauf und -höhe. Das obliegende Sproßinnere ist um die Zeit des ersten Maximums noch weniger stark erwärmt ($1,8\text{--}1,6^\circ$ zwischen 8 und 9 Uhr) als der untere Teil des Flachsprozesses: Der obere Teil strahlt gegen die freie Atmosphäre stärker aus als der untere gegen den warmen Boden; auch ist hier die Luftbewegung schon größer als 2 cm tiefer; und endlich ist die bodennahe Luftschicht offenbar noch nicht bis in diese Höhe hinauf wirksam. Aber seit 10 Uhr steigt auch die Temperatur des höherliegenden Sproßinneren an. Da um diese Zeit im unteren Teil das Temperaturgefälle zwischen bestrahlter und unbestrahlter Seite verschwindet, kann ein Energiegewinn aus der Einstrahlung für den Sproß nicht gut mehr angenommen werden¹⁾.

Obwohl also der untere Teil keinen Energiegewinn durch Strahlung hat, sinkt seine Temperatur nicht mehr weiter ab, sondern steigt sogar seit 11 Uhr wieder (um etwa 3°) an! Dieser Anstieg erfolgt gleichsinnig mit der Lufttemperatur in 15 cm Höhe. Wir müssen daraus schließen — und finden

1) Nun erhält der obere Teil des Flachsprozesses über die strahlungsexponierte Kante zwar noch Energie zugestrahlt, aber dieser Gewinn ist nur gering. Er hält aber für die Zeit des Übergangs über die Schmalseite (mehr als 2 Stunden) an und erwärmt den oberen Sproßteil um maximal $0,3^\circ$ über den unteren.

es noch deutlicher in einem weiteren Versuch (Abschnitt b) bestätigt —, daß diese steigende Gleichgewichtstemperatur bei verminderter Einstrahlung auf die Wirkung der erhitzten bodennahen Luftschicht zurückgeführt werden muß.

War es der Energiegewinn durch Strahlung, der vornehmlich das Maximum am Vormittag bestimmte, und der durch die erhitzte bodennahe Luft, der das Minimum zur Mittagszeit gestaltete, so wirken jetzt beide zusammen, wenn das hohe Maximum des Nachmittags erreicht wird (in diesem Falle $43,7^\circ$). Die Einstrahlung trifft, bei steigendem Einfallswinkel, noch in ziemlicher mittäglicher Intensität auf die exponierte Seite, und die erhitzte bodennahe Luft verhindert durch ein geringes Temperaturgefälle zwischen Pflanze und umgebender Luft einen stärkeren Temperaturverlust. Der Sproß ist in seinem oberen und unteren Teil gleich temperiert, ein deutliches Temperaturgefälle zwischen bestrahlter und unbestrahlter Seite durch das Innere (unterer Teil) hindurch zu erkennen: mit $0,6\text{--}0,8^\circ$ gleich dem am Vormittage.

Zwischen 15 und 16 Uhr aber wird der obere Sproßteil kühler. Die überhitzte bodennahe Luftschicht sinkt zurück, und die Energieabgabe durch Ausstrahlung der Oberkante und die hier stärkere Luftbewegung ist größer als im unteren Teil. Doch auch der folgt seit 16 Uhr dem allgemeinen Temperaturabfall. Der Energiegewinn aus der Einstrahlung wird so gering, daß kein Temperaturgefälle zwischen bestrahlter Außenseite und Sproßinnerem mehr besteht, hingegen ein sehr starkes Gefälle zwischen unbestrahlter Außenseite und Sproßinnerem (infolge der Ausstrahlung und der abgekühlten bodennahen Luft). Um 19 Uhr ist kein Unterschied mehr zwischen bestrahlter und unbestrahlter Seite vorhanden, auch oben und unten sind auf gleicher Temperatur. Damit ist der Übergang zur nächtlichen Temperaturverteilung hergestellt. Die Einstrahlung fehlt völlig, die Ausstrahlung erfolgt bei einem Organ in Profilstellung nicht gegen die freie Atmosphäre, sondern gegen die umgebende Luft und wird dabei praktisch Null (s. GEIGER [1950]), die Temperaturdifferenzen Sproß-Luft betragen daher weniger als 2° . Der weitere Temperaturverlauf in der Nacht wird vor allem durch die umgebende Luft bestimmt (Konvektion [L] und Transpiration [V]). Dies wird deutlich an den Nachttemperaturen vom 9./10. 7. (s. Abb. 11) und ist immer wieder zu erkennen, wenn advektiv herangeführte Luft Luft- und Pflanzentemperaturen gleichsinnig hebt oder senkt. Die nächtliche Temperaturverteilung ist im allgemeinen schon um 21 Uhr erreicht und hält dann bis zur einsetzenden Strahlung an, d. h. bis zu neuerlicher Verschiebung im Energiestrom.

b) Die Temperaturverteilung in Flachsprossen bei Profilstellung in verschiedener Höhe über dem Boden

Dieses als allgemein gültig für eine $\pm$ N-S-Stellung beschriebene Verhalten wird noch bestätigt und unterstrichen durch einen weiteren Versuch (am 31. 7./1. 8.) mit zwei Flachsprossen in verschiedener Höhe über dem Boden (Abb. 10).

Dazu wurden die $\frac{3}{4}$ cm dicken Versuchssprosse bei $\pm$ N-S-Profilstellung in 4 bzw. 16 cm über dem Boden übereinandergestellt. Die Anordnung der Thermoelemente unter den Epidermen entsprach dem geübten Verfahren.

Wenige Tage vorher war durch den Einbruch trockenheißer Luft afrikanischer Herkunft die sommerliche Hitzeperiode übersteigert worden und klang nun aus. Die ungestörte Einstrahlung ist mit rund $1,14 \text{ cal/cm}^2\text{min}$ so hoch wie an den anderen Tagen auch, doch konnte sie die Temperatur der Bodenoberfläche nicht mehr über 60° ansteigen lassen (Maximum $58,5^\circ$). Ebenso überschreitet die Luft in 200 cm nicht mehr 25° . Der Wind weht mäßig, aber uneinheitlich und stärker als am 14. 7., namentlich in den Morgen- und Vormittagsstunden (unruhiger Temperaturanstieg, besonders in dem bodenferneren Exemplar). Der Tag wurde nicht als heiß empfunden.

Daher steigt denn auch die Temperatur der bodennahen Luft in 15 cm Höhe nur knapp über 30° und jeweils nur vorübergehend. Die Temperaturabnahme ($0 \cdots 15 \text{ cm}$) errechnet sich zu $1,8^\circ/\text{cm}$. Bei der geringen Temperatur der Bodenoberfläche ist mithin die bodennahe Luftschicht nicht so extrem entwickelt wie an den anderen Versuchstagen.

Wenn trotzdem das Temperaturniveau der Flachspresse in gleicher Höhe liegt wie am 14. 7., dann kann das daher kommen, daß die Scirocco-Strapaze die Sprosse hat recht trocken werden lassen, wodurch ihre Erwärmung größer werden konnte.

Der Tagesgang der Temperatur folgt im allgemeinen der schon festgestellten Gesetzmäßigkeit. Bemerkenswert ist aber, daß im Anstieg zum ersten Maximum das Temperaturgefälle von bestrahlter zu unbestrahlter Seite im oberen Sproß (16 cm) mit rund $2,2^\circ$ viermal größer ist als bei dem unteren (4 cm) mit $0,5^\circ$. Es ist vor allem die unbestrahlte Seite des oberen Sprosses, deren Temperatur das Gefälle so groß werden läßt, während in dem bodennahen Sproß ein solch auffälliger Gegensatz nicht vorhanden ist. Nun beginnt am frühen Vormittag die heiße bodennahe Luftschicht sich erst zu entwickeln; sie kann daher vielleicht in 4 cm Höhe schon wirksam werden, bestimmt aber noch nicht in 16 cm. Später aber zeigt sich dann auch das Temperaturgefälle im oberen Sproß von der gleichen Größe wie beim unteren (etwa 9 Uhr). Diese Wirkung der erhitzten bodennahen Luft wird aber mit steigender Bodenoberflächentemperatur noch nachhaltiger in der Zeit des mittäglichen Minimums. So beginnt der untere Sproß seinen Temperaturanstieg (wieder um 11 Uhr) bei Temperaturgleichheit zwischen beiden Seiten, also ohne Energiegewinn aus der Strahlung. Der höhere Sproß folgt — man beachte die Gleichsinnigkeit mit der Lufttemperatur in 15 cm — erst

eine Stunde später, obwohl schon ein Temperaturgefälle erkennbar geworden ist. Also nicht der Energiegewinn durch Strahlung allein, sondern vor allem die erhitzte bodennahe Luft bestimmt in der Zeit geringsten Strahlungs-genusses die Pflanzentemperatur.

Natürlich kommt bei den massigen Flachsprossen mit ihren relativ kleinen Oberflächen noch eine thermische Trägheit hinzu, wegen der das Minimum der Mittagsstunde nur sanft gleitend erreicht wird. Aber gerade dieses geringeren Wärmeüberganges wegen werden die Verhältnisse am Modell der *Opuntia* deutlicher als bei dünnen Blättern mit ihren auf- und abtanzenden Temperaturen.

Zur Zeit des nachmittäglichen Maximums sind die Temperaturen der beiden Sprosse zunächst nur durch ihre Höhe unterschieden (höhere Ausgangstemperatur [12 Uhr] des unteren Sprosses infolge seines etwas anderen Energiehaushaltes während des mittäglichen Minimums), die Gefälle zwischen ihren bestrahlten und unbestrahlten Seiten gleich groß. Die Energiebilanz muß also bei beiden (annähernd) gleich sein. Während die von der Nachmittagssonne voll getroffenen lotrechten Sproßseiten noch erwärmt werden, beginnt die Temperatur der bodennahen Luft (15 cm) merklich zurückzugehen, da sie nicht mehr so nachhaltig erhitzt wird. Zugleich mit ihrem Rückgang (15 Uhr) steigt aber auch das Gefälle im oberen Sproß auf das Doppelte desjenigen im unteren. Er gerät jetzt aus der überhitzten Zone heraus, und damit muß das Gefälle von der energiereicheren bestrahlten zur energieärmeren unbestrahlten Seite schnell größer werden. Beide Sprosse schließen sich aber erst eine Stunde später (16 Uhr) — und zwar wegen der abnehmenden Strahlung gleichsinnig — dem allgemeinen Temperaturfall an.

In der nächtlichen Temperaturverteilung ist das bodennahe Exemplar um ein geringes kühler als das bodenfernere, da es sich in der durch Ausstrahlung stärker abgekühlten bodennächsten Luft befindet (der Temperaturunterschied ist aber auffallend klein).

Auf ein anderes muß aber noch hingewiesen werden. Der gegenüber dem „Normtage“ (14. 7.) stärkere Wind der Morgen- und Vormittagsstunden drückt nicht nur die Temperatur des ersten Maximums um mehr als 2°, sondern er verwischt auch wesentliche Unterschiede der Temperatur zwischen beiden Meßhöhen, da er für kräftigere Durchmischung innerhalb der bodennahen Luft sorgt. Andererseits läßt er — da er dann schwächer ist als am „Normtage“ — das nachmittägliche Maximum um rund 2° höher ansteigen (45,3 bzw. 44,1° bei dem unteren, 42,3 bzw. 40,9° bei dem oberen Sproß). Dieser Einfluß des Windes und der Ventilation auf die Temperatur der Pflanze wird noch deutlicher vorgeführt werden.

e) Profilstellung in verschiedener Himmelsrichtung. Einfluß des Windes.

In den beiden angeführten Versuchen haben wir in erster Linie die Bedeutung der bodennahen, erhitzten Luft für die Temperatur von Pflanzen

auf trockenheißen Standorten aufzeigen können. Strahlung und Wind als temperaturbestimmende Faktoren sollen jetzt anhand des Versuches vom 9./10. Juli näher behandelt werden (Abb. 11).

In diesem Versuch wurden die Temperaturverhältnisse in zwei Flachsprossen untersucht, die in Profilstellung, aber in einer um 90° versetzten Orientierung zueinander standen. Der eine, ältere und größere, ragte in Verlängerung des halbkreisförmigen Muttersprosses mit seiner Sproßebene in NW-SE-Orientierung frei in die umgebende Luft; der andere, jünger und etwas turgeszenter, stand senkrecht von der Fläche des Muttersprosses, mit seiner Sproßebene NE-SW orientiert, ab, war aber sonst nicht weiter beeinflußt. Die Thermoelemente waren in ganzer Länge gleichmäßig zwischen den beiden Außenflächen in der Mitte der Sprosse eingestochen. Der geringe Unterschied in der Meßhöhe (4,5 bzw. 6 cm) kann vernachlässigt werden.

Die ungestörte Einstrahlung (max. $1,14 \text{ cal/cm}^2\text{min}$) erwärmt die Bodenoberfläche auf 61° . Die Lufttemperatur in 200 cm ist mit 23° (10, 13, 16-Uhr-Termine) keineswegs hoch. Bei mäßig starkem Wind, vor allem in den Nachmittagsstunden (Beaufort 4), wurde der Tag nicht als sehr warm empfunden.

Die bodennahe Luftschicht ist auch nicht besonders stark erhitzt: In 13 cm werden 30° nur vorübergehend und knapp überschritten bei einem stärkeren Temperaturgefälle ($0 \dots 13 \text{ cm}$) von $2,4^\circ/\text{cm}$.

Der Sproß in $\pm$ NW-SE-Orientierung folgt im wesentlichen der schon beschriebenen Gesetzmäßigkeit mit einem ersten, kleineren Maximum am Morgen, einem schwachen Minimum während des Strahlungsüberganges über die Schmalkante und einem zweiten Maximum am Nachmittag. Daß dieses an unserem Versuchstag nicht zu dem erwarteten Hauptmaximum wird, ist dem Einfluß des Windes zuzuschreiben.

Der Temperaturverlauf einer Profilstellung wird also charakterisiert durch eine Incision, die die Zeit des Strahlungsüberganges über die Schmalkante markiert. Sie verschiebt sich zeitlich je nach der Orientierung des betreffenden Körpers, und sie muß sich schließlich verdoppeln, wenn in seiner Orientierung die W-E-Komponente dominiert. Denn dann kann der Strahlungsübergang zweimal erfolgen. Organe in W-E-Orientierung („transversale Kompaßstellung“) haben daher — weil diese doppelte Incision mit den Strahlungsminima am Morgen und am Abend zusammenfällt — im Prinzip den gleichen Temperaturverlauf wie horizontal stehende; er unterscheidet sich von diesem nur durch die Amplitude (Sonnenstand). Mit dieser zeitlichen Verschiebung aber ändert sich zugleich auch die Stärke des Temperaturrückganges. Bezüglich des Energiegewinnes aus der Strahlung müßten diese Minima gleichwertig sein, da dann die Insolation praktisch Null wird. Daß sie das aber tatsächlich nicht sind (wie wir gleich sehen werden), ist auf den Einfluß der anderen Faktoren der Energiebilanz, so z. B. auf die Temperatur und den Bewegungszustand der Luft und auf die Verdunstung zurückzuführen. Je weiter dieses Minimum in die Zeit der all-

gemeinen Erwärmung fällt, um so schwächer muß es ausgebildet sein. Die bodennahe Luftschicht ist dann um so mehr erhitzt, und damit wird das Temperaturgefälle Pflanze - Luft kleiner¹⁾ (oder kehrt sich sogar um), die Verdunstung läßt im allgemeinen infolge temporären Wasserdefizits nach.

Wir erkennen solch späteres und flacheres Temperaturminimum im Temperaturgang des zweiten Flachsprosses²⁾; es folgt auf das erste Maximum, das um 6 Stunden (entsprechend einer Winkelversetzung um 90°) gegen das des anderen Sprosses verschoben und höher ist. Dieses erste Maximum muß auch zugleich das Hauptmaximum werden. Denn das zweite (hier durch den Wind unkenntlich gemacht) kann nur kleiner sein, da die Strahlungsintensität am Abend minimal geworden ist (wenn es nicht sogar — wegen der zurücksinkenden warmen bodennahen Luft — tiefer als das „Minimum“ zu liegen kommt).

Bisher wurde der Vorzug einer Profilstellung im wesentlichen in dem Ausweichen vor der intensiven Einstrahlung gesehen. Doch darf — wie die vorliegenden Untersuchungen zeigen — der Anteil der anderen Glieder des Energiehaushaltes dabei nicht außer acht gelassen werden. Sie können durchaus das Absinken der Gleichgewichtstemperatur infolge der verminderten Einstrahlung zu einem guten Teil aufheben. Doch werden wir zu einer näheren Betrachtung der Profilstellung (s. ..Abschließende Besprechung der Ergebnisse“) erst übergehen können, wenn wir die Temperaturverhältnisse horizontal exponierter Organe kennengelernt haben.

Zuvor sei noch die Wirkung des Windes erwähnt, der in den Nachmittagsstunden mit Stärke 4 weht und der die Temperaturen für eine längere Zeit auf nahezu konstanter Höhe hält. Für den NW-SE-orientierten Sproß, der in den Nachmittagsstunden sein zweites, großes Maximum erreichen müßte, bedeutet dieser Wind — im Vergleich zu den ungestörten Tagen (bei sonst gleichen Bedingungen: Strahlung, Temperatur der bodennahen Luft) — einen Temperaturverlust von etwa 11°! Der stärkere Wind beseitigt — wie auch noch später gezeigt werden wird (Kap. 5b u. c) — selbst bei Energiezufuhr (nachmittägliche Einstrahlung auf die SW-exponierte Seite) jeden Temperaturanstieg (nur knapp 1°). Er hält aber auch bei geringer Einstrahlung (Sproß in NE-SW-Orientierung) nach leichtem Absinken eine gleichmäßige Temperatur aufrecht. Über diese gleiche Auswirkung unterschiedlicher Energieströme kann nur eine genaue Analyse der Energiebilanz Auskunft geben, wozu hier ausreichende Unterlagen fehlen.

1) In der Formel $L = -\alpha(\vartheta - \vartheta_L)$ wird ϑ wegen des Strahlungsminimums kleiner, ϑ_L aber wegen der bodennahen heißen Luft größer.

2) Es ist ebenfalls durch den Windeinfluß überdeckt, ist aber doch noch (um 14 Uhr) zu entdecken.

5. Flachsprosse von *Opuntia ficus indica* in bodenparalleler (horizontaler) Stellung

Um die Temperaturverhältnisse in einem waagerechten pflanzlichen Organ festzustellen, wurden die untersuchten Flachsprosse zwangsweise bodenparallel fixiert, so daß sie den ganzen Tag über der Einstrahlung voll ausgesetzt waren, die in den Mittagsstunden fast senkrecht auf die Sproßfläche fiel. Da die Sprosse sich nur wenige Zentimeter über dem Boden befanden, durften — wenn überhaupt — hier maximale Temperaturen gefunden werden.

Im Gegensatz zu den Versuchen mit Sprossen in Profilstellung waren die Witterungsbedingungen nicht so einheitlich vorteilhaft; nur an zwei Tagen war die Einstrahlung ungestört. Viel unangenehmer macht sich der Windeinfluß bemerkbar: Die stärkere Luftbewegung (Beaufort 3 und höher) während dieser sonst heißesten Zeit ließ die erwarteten Rekordtemperaturen ausbleiben. Immerhin überschreiten die gefundenen Maxima 45° und in drei der ausgewählten Fälle sogar 50° (absolut höchstes Maximum $54,1^{\circ}$). Sie liegen damit um $5\text{--}8^{\circ}$ über den bei Profilstellung gefundenen.

a) Die Temperaturverteilung innerhalb eines Flachsprosses in horizontaler Lage

Das Kennzeichnende eines Tagesganges sei dargelegt an der Aufnahme vom 18./19. 7. (Abb. 12).

Die Einstrahlung ist ungestört und läßt bei nur wenig verminderter Intensität ($1,1 \text{ cal/cm}^2\text{min}$) um 12 Uhr die Temperatur der Bodenoberfläche auf 62° ansteigen. (Am folgenden Tag werden 68° gemessen.) Die Lufttemperatur in 200 cm Höhe überschreitet schon um 7 Uhr morgens 25° und liegt mehr als 12 Stunden lang über diesem Wert (Maximum $30,4^{\circ}$). Der Wind weht einheitlich aus westlicher Richtung, bis zum Nachmittag ziemlich stetig mit Windstärke 3, steigert sich dann auf Beaufort 4 und 5. Trotzdem erniedrigt er die Lufttemperatur in 200 cm Höhe kaum. Seine Wirkung auf bodennahe Luftschicht und Pflanze ist vor allem in dem größeren Austausch und der stärkeren Durchmischung zu suchen.

Die Temperatur der bodennahen Luftschicht in 15 cm Höhe liegt ebenfalls weit über 25° und überschreitet für 8 Stunden 30° (maximal $34,8^{\circ}$). Das würde einer Temperaturabnahme (0...15 cm) von $2^{\circ}/\text{cm}$ entsprechen und bedeutet bei der heißen Bodenoberfläche nicht nur eine stark, sondern auch eine hoch hinauf erhitzte bodennahe Luft. Straßenspiegelung und hochreichende Luftunruhe ließen dieses deutlich werden.

Im untersuchten Flachsproß wurde 8 cm über dem Boden gemessen unter der Epidermis der „künstlichen“ Ober- bzw. Unterseite sowie im Sproßinneren zwischen beiden Außenmeßstellen. Ein noch freies Thermoelement verfolgte die Lufttemperatur unmittelbar über der Oberseite (2 mm).

Der Temperaturverlauf eines horizontal stehenden Flachsprosses ist — im Idealfalle — eingipflig und hat dann sein Maximum kurz nach dem Strahlungsmaximum. Ihm fehlt die charakteristische Incision der Profilstellungen. Das Strahlungsglied S der Energiebilanzaufstellung wird hier (im Gegensatz zu der Profilstellung) nur durch Vorgänge verändert, die außerhalb der Pflanze geschehen. Es wirkt daher — solange der Strahlungs-

haushalt ungestört ist —, am Tage im Sinne einer Steigerung, bei Nacht im Sinne einer Senkung der Gleichgewichtstemperatur.

Beginnen wir mit den Temperaturverhältnissen bei Nacht. Bei Flachsprossen in Profilstellung kann der nächtliche Strahlungsaustausch nur mit der umgebenden Luft erfolgen und wird daher sehr bald bedeutungslos; darum betragen die Temperaturdifferenzen zwischen Sproß und umgebender Luft weniger als 2° (s. S. 520). Anders bei horizontal gestellten¹⁾. Hier vollzieht sich der Strahlungsaustausch einmal mit dem (meist wärmeren) Boden, zum anderen mit der freien Atmosphäre. Es wird bei ihnen daher ein Temperaturgefälle von der Unterseite zur Oberseite (von wenigen zehnteln Grad) deutlich; auch steigt die Temperaturdifferenz von Sproß (4 cm) gegen umgebende Luft (15 cm) auf $3-4^{\circ}$, ist also trotz höherer Lufttemperatur fast doppelt so groß wie bei Sprossen in Profilstellung (vgl. Abb. 10 und 11). Selbst gegen die in 2 mm über dem Sproß gemessene Lufttemperatur ist der Sproß schon gut 1° kühler.

Dies ist die Folge der ungestörten Ausstrahlung der Oberseite einerseits und andererseits der geringen Ausstrahlung der Unterseite. Denn wird dieser Energieverlust (der Oberseite) herabgesetzt, dann schrumpft nicht nur die Temperaturdifferenz gegen die umgebende Luft zusammen (hier bis auf 1°), sondern dann verschwindet auch das Gefälle zwischen Ober- und Unterseite. Das sehen wir am 23. 7. von 4 bis 4.30 Uhr (s. Abb. 13a), als eine Wolke vorübergehend den Standort einhüllte. Dabei sank die Lufttemperatur in 200 cm, während sich die bodennahe Luft erst hinterher dem Temperaturfall anschloß. Die Temperaturdifferenzen innerhalb der Sprosse verschwinden bei ansteigender Organtemperatur (herabgesetzte Ausstrahlung), um erst später wieder (bei neuerlichem Sinken der Temperatur nach der Einhüllung) aufzutreten.

Endlich können die bodennäheren Flachsprosse auch etwas wärmer sein (2 bis 4 zehntel Grad) als die bodenferneren, weil sich bei Bedeckung durch den oberen der Strahlungsaustausch des unteren nicht mit der freien Atmosphäre abgespielt, sondern mit dem darüberliegenden Organ.

Natürlich ist auch die bodennahe Luft und ihre nächtliche Schichtung — die im Falle von Profilstellung in erster Linie die Pflanzentemperatur bestimmte — von Einfluß, wie wir es in den gleichsinnigen Bewegungen der Pflanzen- und der Lufttemperaturen erkennen können. Nur wirken bei Horizontalstellung Strahlungsglied S und Konvektionsglied L in den

1) Hier müssen die Verhältnisse der Nacht vom 9./10. 7. (Profilstellung) (Abb. 11) und vom 22./23. 7. (Horizontalstellung) (Abb. 13) miteinander verglichen werden. In beiden Nächten war der Himmel klar, in der erstgenannten die Temperatur $8-10^{\circ}$ niedriger als in der zweiten, die Feuchte größer (Taupunkt 14 bzw. 8°).

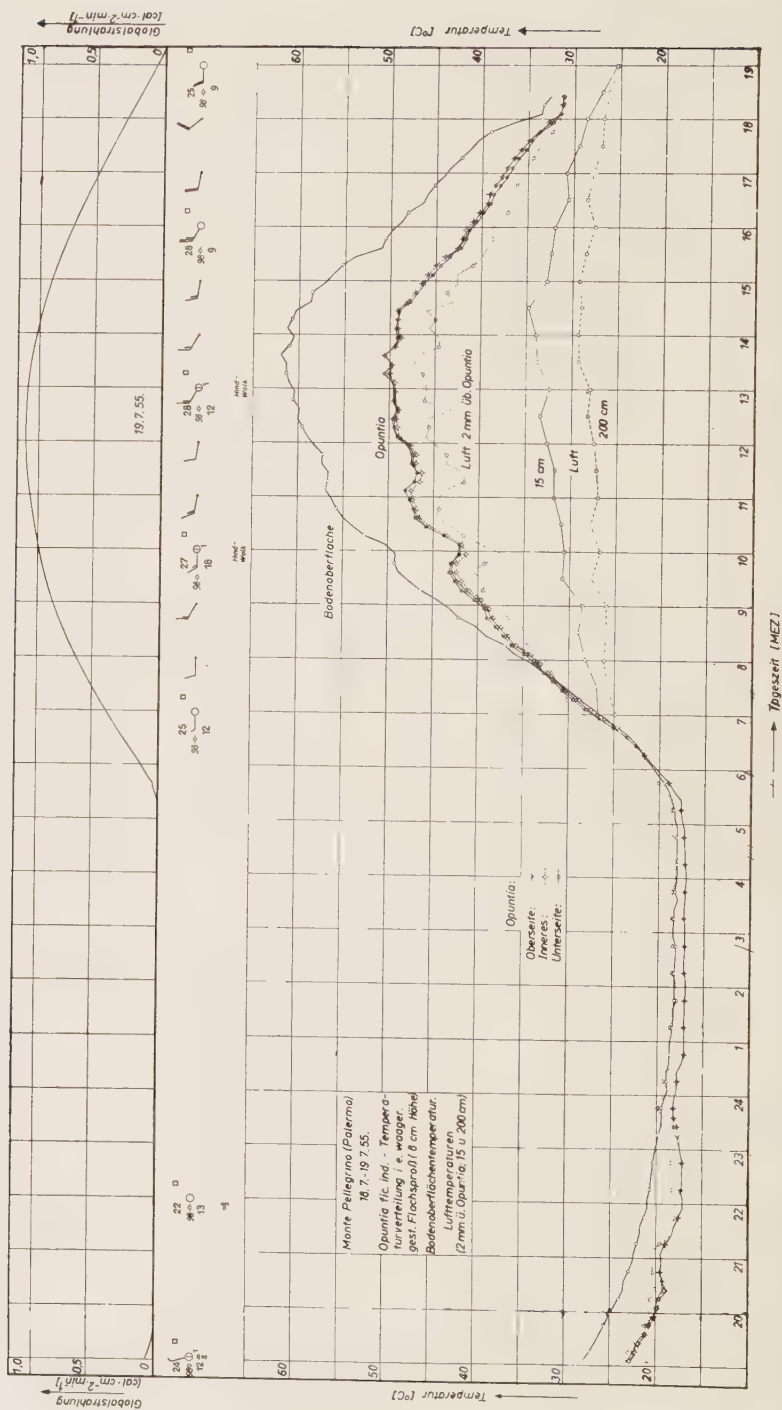


Abb. 12. Tagesgang der Temperatur und Temperaturverteilung in einem Flachsproß von *Opuntia ficus indica* in horizontaler (Zwangs-) Lage 8 cm über dem Boden (19. 7. 1955 auf dem Monte Pellegrino bei Palermo).

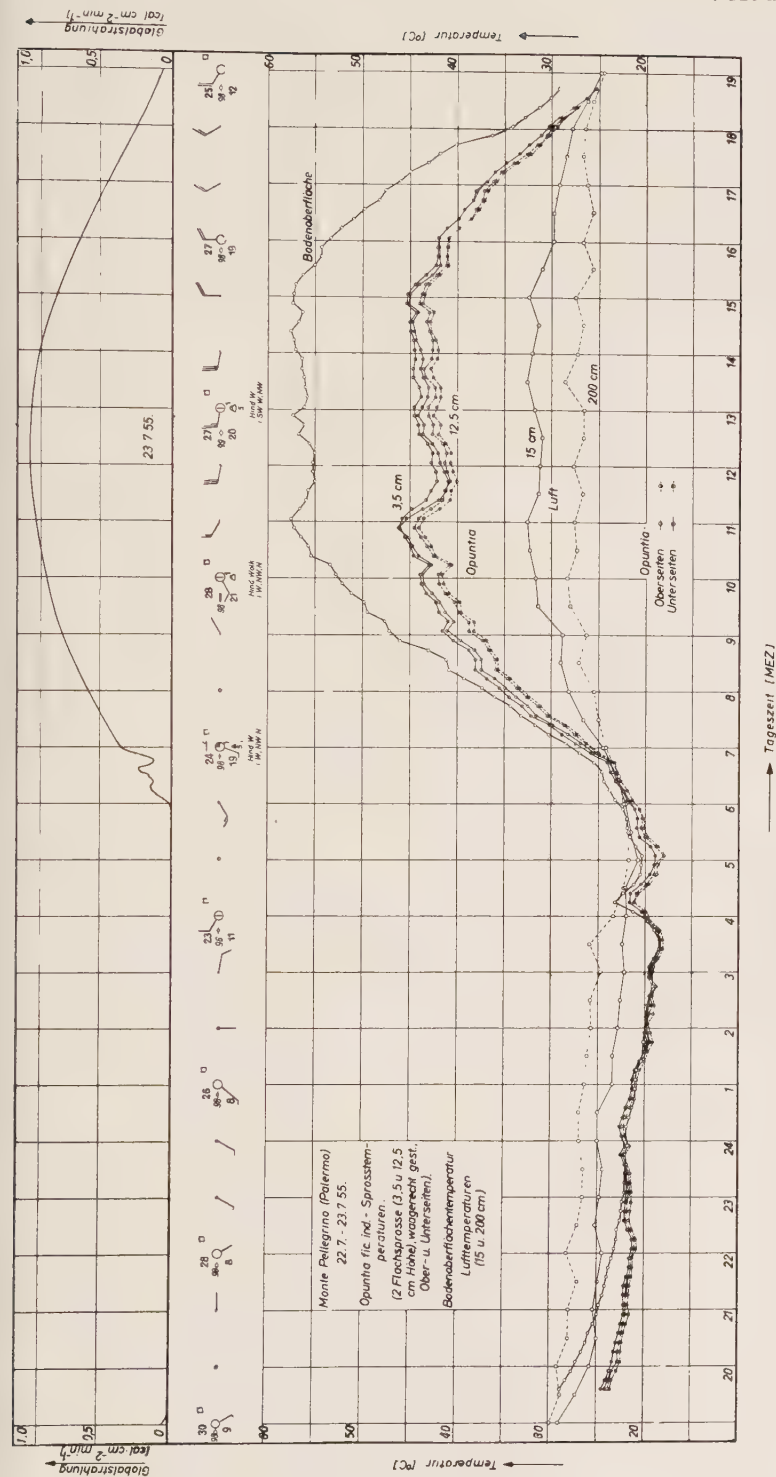


Abb. 13. Tagesgang der Temperatur und Temperaturverteilung in zwei Flachsprössen von *Opuntia ficus indica* in horizontaler (Zwangs-) Lage in verschiedener Höhe über dem Boden (23. 7. 1955 auf dem Monte Pellegrino bei Palermo).

nächtlichen Gleichgewichtstemperaturen zusammen. (Bei kräftiger Warmluftzufuhr [Scirocco] kann das sonst etwas kühlere bodenfernere Exemplar wärmer werden als das bodennahe, das sich in der durch Ausstrahlung kälteren und stabileren Luft befindet [s. auch Kap. 6]).

Zeigt sich der Temperaturverlauf schon in der nächtlichen Ausbildung extremer als derjenige von Organen in Profilstellung, muß er dies in viel

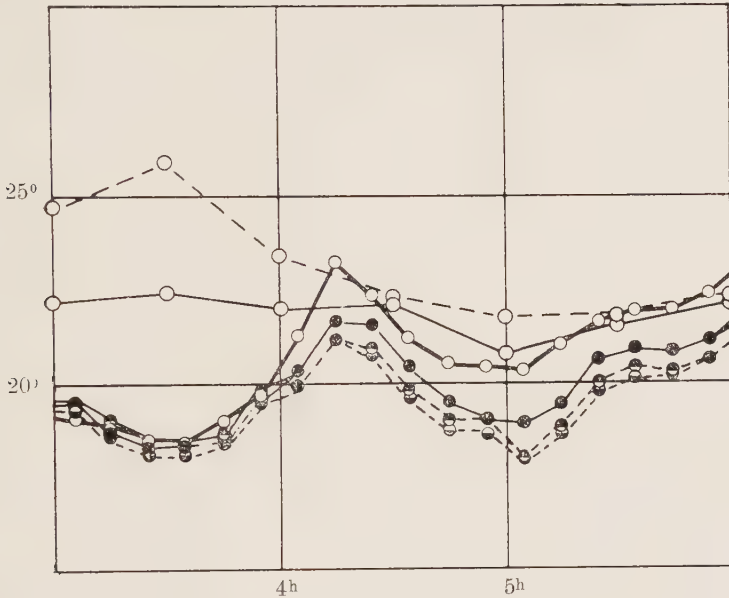


Abb. 13 a. Ausschnitt aus Abb. 13: Temperaturverteilung in zwei Flachsprossen von *Opuntia ficus indica* in horizontaler (Zwangs-)Lage in verschiedener Höhe über dem Boden während eines Wolkendurchgangs.

- — — — ○ Lufttemperatur in 200 cm Höhe
- — — — ○ Lufttemperatur in 15 cm Höhe
- — — — ○ Temperatur der Bodenoberfläche
- — — — ● Temperatur im Flachsproß (3,5 cm) Oberseite
- — — — ● Temperatur im Flachsproß (3,5 cm) Unterseite
- — — — ● Temperatur im Flachsproß (12,5 cm) Oberseite
- — — — ● Temperatur im Flachsproß (12,5 cm) Unterseite

stärkerem Maße am Tage sein, wo er ja im wesentlichen der Strahlung folgt. Da hierbei leicht die Grenzbereiche der Existenzfähigkeit erreicht werden können, kommt den anderen Gliedern der Wärmehaushaltsgleichung ein besonderes Gewicht zu, weil sie die Gleichgewichtstemperaturen erhöhen, aber auch erniedrigen können.

An dem vorgeführten Versuchstage mußten — unter den gegebenen günstigen Bedingungen — alle Faktoren zu hohen Gleichgewichtstemperaturen führen. Das Tagesmaximum von 51° liegt damit (bei annähernd vergleichbaren Außenbedingungen)

rund 7° über dem des gleichen Sprosses in Profilstellung. Welche Wirkung Wind und bodennaher Luft (deren temperaturbestimmenden Einfluß wir bei der Betrachtung der Profilstellung hervorgehoben haben) auf die Gleichgewichtstemperaturen zukommt, werden wir in den Besonderheiten derjenigen Versuchstage erkennen, an denen die Witterungsbedingungen nicht so ungestört günstig waren.

Doch bevor wir diese einzelnen Faktoren untersuchen, sei auf eine zunächst verblüffende Beobachtung hingewiesen: Obwohl am vorgeführten Versuchstage 8 cm über dem Boden gemessen wurde — also doch schon nicht mehr in der allzu heißen Zone bodennächster Luft —, finden wir die Unterseite des Flachsprosses am Vormittag und am späten Nachmittag wärmer als seine Oberseite (hier bis $0,5^{\circ}$). Diese überraschende Temperaturverteilung findet sich in allen Versuchen wieder, die mit horizontal gestellten Flachsprossen in der trockenen und heißen Zeit ausgeführt wurden. Zwei später — der Vollständigkeit halber — dazu unternommene Versuche zeigen sie nicht mehr (gänzlich veränderte Bedingungen wie feuchter Boden usw.). Sie konnte an anderen Versuchstagen bis über 1° anwachsen.

Demnach müssen auf der Unterseite eines solchen Flachsprosses Prozesse wirksam sein, die entweder Energie zuführen oder aber eine stärkere Energieabgabe verhindern. Als solche bieten sich zur Erklärung an:

1. Der im Gegensatz zur Oberfläche andere Strahlungshaushalt, vor allem die geringere Ausstrahlung gegen den Boden, aber auch der Energiegewinn aus einer Reflex- oder Bodenrückstrahlung.

2. Die unterschiedliche Verdunstung der Unterseite (äquifazialer Bau).

3. Die bodennahe Luft, die unter einem derartig exponierten Organ infolge verhinderten Austausches auf kleinstem Raum andere Bedingungen für das Konvektionsglied L und das Transpirationsglied V schafft.

Wir werden bei der Durchmusterung aller Versuche mit horizontal stehenden Flachsprossen klären müssen, welche dieser Bedingungen und in welcher Größe sie für diese Temperaturerhöhung in Frage kommen.

b) Die Wirkung des Windes auf horizontalstehende Flachsprossen von *Opuntia ficus indica*.

Welche Wirkung der Wind auf die Höhe der Pflanzentemperatur, ihren täglichen Gang und das Gefälle in horizontal stehenden Flachsprossen haben kann, zeigt anschaulich der 23. 7. (Abb. 13). (S. dazu auch: 19. 7. [Abb. 12], 25. 7. [Abb. 15]).

Am 23. 7. sollte der Unterschied in der Temperaturverteilung zwischen Ober- und Unterseite an zwei horizontal fixierten Flachsprossen (Stärke der Flachspresse und Anordnungsweise der Thermoelemente entsprach den bisher geübten Verfahren) dargestellt werden, die sich in verschiedener Höhe (3,5 bzw. 12,5 cm) über dem Boden befanden. Dabei lag der obere über dem unteren, jedoch ohne Schatten auf ihn zu werfen.

Trotz der ungestörten Einstrahlung (mittägliches Maximum $1,1 \text{ cal/cm}^2\text{min}$) überschreitet die Temperatur der Bodenoberfläche nur vorübergehend einmal 57° . Auch die Lufttemperatur in 200 cm Höhe bleibt (nach einer ungewöhnlich warmen Nacht mit Temperaturen zwischen 27 und 25° sowie geringer relativer Luftfeuchtigkeit von 30 — 35%) unter 30° , hält sich aber immerhin 11 Stunden lang über 25° . Der Tag wurde nicht als warm empfunden, weil ein starker Wind für ausreichende Kühlung sorgte. Seiner Wirkung ist es daher auch zuzuschreiben, wenn die bodennahe Luft (15 cm) — zwar 6 Stunden lang über 30° liegend — tüchtig durchmischt worden ist. Denn bei einer niedrigen Temperatur der Bodenoberfläche bedeutet die Temperaturabnahme (0...15 cm) von $1,6^\circ/\text{cm}$ eine nicht übermäßig erhitze bodennahe Luftschicht mit geringem Temperaturgefälle.

Dieses trifft nun nicht für den ganzen Tag zu. Denn bei kaum merklicher Luftbewegung steigen zunächst die Temperaturen von Bodenoberfläche und Flachsprossen stetig an, wobei wir bemerken, daß der untere Flachsproß, der sich in der noch allzu heißen bodennahen Zone befindet, um 1 — 2° wärmer ist als der obere.

Nach 11 Uhr fallen — bei klarem Himmel! — die Temperaturen von Bodenoberfläche und Pflanzen stark ab, und zwar um mehr als 2° bei der Bodenoberfläche und um 4 — 5° in den beiden Flachsprossen; dabei bleibt zwischen ihnen die Differenz von 1 — 2° erhalten. Es ist dieses die Folge eines heftigen Windes, der mit Stärken 5 und 6 bis in den Nachmittag hinein über den Standort fegt und den auf Grund der ungestörten Einstrahlung zu erwartenden Temperaturanstieg kappt. Die Tagesmaxima sind daher schon um 11 Uhr erreicht ($46,0$ bzw. $44,5^\circ$). Bei einer sinnvollen Idealisierung des Temperaturverlaufes würden 50° in der Pflanze zweifellos überschritten worden sein, so daß wir dem Wind in dieser Stärke eine Temperatursenkung von mindestens 5° zuordnen dürfen. Selbst die intensive Einstrahlung der Mittagszeit auf die fast senkrecht exponierte Fläche kann das gleichförmige Temperaturniveau nicht heben. (Bei Profilstellung war die Senkung bei schwächerem Wind [4] mit etwa 11° noch größer!)

Noch auffälliger ist der Windeinfluß am 26. 7., wo ein stürmischer Scirocco (Beaufort über 6) die Lufttemperaturen in Palermo auf über 40° hochjagte; auf dem Monte Pellegrino zeigte das Maximumthermometer $38,5^\circ$. Trotz dieser glutheißen und trockenen (unter 20%) Luft liegen die Temperaturen für die bodennahen Pflanzen (die Registrierungen können quantitativ nicht ausgeschöpft werden) um 45° , d. h. wesentlich niedriger als an weniger heißen, aber windruhigen Tagen! (Die Luftbewegung geht über die Wärmeübergangszahl α , die Trockenheit der Luft über das Sättigungsdefizit $[E-e]$ in das Verdunstungsglied V ein; beide bewirken eine erheblich stärkere Verdunstung [vgl. dazu Kap. 6].) Auch hier hält der Wind wieder das Temperaturniveau auf gleicher Höhe, verwischt aber den Unterschied zwischen oberem und unterem Flachsproß, und läßt die thermisch trägen Opuntien in ihren Temperaturen wirr durcheinandertanzen.

Dagegen hatte der Wind, der am 19. Juli im großen und ganzen als schwache Brise (Beaufort 3) wehte, — außer geringfügigen Temperaturrückgängen — keinen erkennbaren Einfluß auf die Temperatur (Maximum 51°), ebenso wie am 25. Juli, wo die Temperatur des bodennäheren Flachsprosses bei maximaler Windstärke 2 nicht höher als 50° steigt. Da nun bei kleinen Windgeschwindigkeiten in 200 cm Höhe die Luftbewegung dicht über dem Boden minimal wird, tritt im Konvektionsglied L die Wärmeübergangszahl α hinter der Größe des Temperaturgefälles gegen die umgebende Luft sehr zurück, d. h. nur die Temperaturdifferenz ($\vartheta - \vartheta_L$) geht wirksam ein. Die aber muß in Bodennähe gering sein, solange wegen der schwachen (dynamischen) Turbulenz die überhitzte bodennahe Luftschicht erhalten bleibt. (Da α auch in dem Verdunstungsglied V enthalten ist, wird auch diese im Sinne einer geringeren Senkung der Temperatur wirken müssen.)

e) Der Einfluß der bodennahen Luft auf die Temperatur horizontalstehender Flachsprosse

Wir kommen damit zu dem angedeuteten Problem zurück (s. S. 528), daß die Unterseite eines bodennahen Flachsprosses wärmer sein kann. An dem vorgeführten Versuchstage (23. Juli [Abb. 13]) ist am Vormittage bei dem höheren Sproß (12 cm) ein Temperaturgefälle von der Ober- zur Unterseite gerichtet, das von 4 auf 6 zehntel Grad zunimmt. Bei dem unteren Sproß (3,5 cm) zeigt sich dagegen die Unterseite bis zu 6 bis 8 zehntel Grad wärmer als die Oberseite, welches Gefälle aber mit steigender Sonnenhöhe abnimmt (stärkerer Temperaturanstieg der bestrahlten Oberseite). Sobald nun der starke Wind einsetzt, verkehrt sich dieses Gefälle. Die Unterseite wird nun (bis zu $1,5^{\circ}$) kühler als die Oberseite (wenn der Wind nachläßt, verringert sich diese Differenz auf 0,5 bis 1°). Auch bei dem oberen Sproß vergrößert sich das Gefälle weiter (auf 6 bis 8 zehntel Grad).

Es wird also durch die bessere Ventilation einmal das Temperaturniveau nur gesenkt, ohne daß an der grundsätzlichen Verteilung (oberer, unterer Sproß) etwas verändert wird (vgl. auch bei Profilstellung): der Wind wirkt nach Bewegungszustand (α) und Gefälle ($\vartheta - \vartheta_L$) in beiden Höhen annähernd gleich ein. Sodann aber werden durch die bessere Ventilation auf den Unterseiten temperaturerhöhende Prozesse aufgehoben, was durch eine gesteigerte Verdunstung und durch Schaffung eines wirksameren Temperaturgefälles leicht erklärt werden kann.

Eine Reflex- oder Bodenrückstrahlung aber müßte, da sie nicht an vermittelnde Materie gebunden ist, ebenso wie die direkte Einstrahlung auf die Oberseite in ihrer Wirkung bestehenbleiben. Die bessere Ventilation, die Ober- und Unterseite ziemlich gleichmäßig betrifft, sollte daher auch beider

Temperaturen in gleichem Verhältnis herabsetzen, was aber nicht geschehen ist. Es ist daher wenig wahrscheinlich, die höhere Temperatur der Unterseite auf das Konto einer Reflex- oder Bodenrückstrahlung zu setzen.

Was hat uns dazu der 22. 7. zu sagen, ein Tag an dem bei wechselndem Wind und veränderlicher Einstrahlung die Temperaturen der Bodenoberfläche und der beiden horizontal stehenden Flachsprosse (3,5 bzw. 12,5 cm) auf- und niederschwingen (Abb. 14)? (Trotzdem wurden an diesem Tage die Maxima der Pflanzen- und Bodenoberflächentemperaturen gefunden.)

Die dreimal mehr oder weniger stark unterbrochene Einstrahlung erreicht mit $1,1 \text{ cal/cm}^2\text{min}$ ihr mittägliches Maximum und läßt die Temperatur der Bodenoberfläche auf fast 70° ansteigen. Die hohen Lufttemperaturen (Maximum $34,2^\circ$) liegen fast 11 Stunden lang über 30° , nur einmal (11 Uhr) unwesentlich unterbrochen, als der Wind, der nur als leichte Brise wehte, vorübergehend auf Stärke 5 auffrischte. Der Tag wurde als sehr warm empfunden.

Die Temperatur der bodennahen Luft (15 cm) liegt ebenfalls den ganzen Tag über 30° , davon fast 4 Stunden über 35° (maximal $37,6^\circ$). Die Temperaturabnahme ($0 \dots 15 \text{ cm}$) beträgt in der Zeit der stärksten Erwärmung $2,1^\circ/\text{cm}$. Das bedeutet bei der hohen Temperatur der Bodenoberfläche eine sehr hoch hinauf erhitzte bodennahe Luftschicht. Ein Kennzeichen dieser Überhitzung ist eine Kleintrombe um 9,30 Uhr, die unmittelbar neben der Station mit pfeifendem Geräusch Pappdeckel, dürre Zweige und verdorrtes Gras in die Luft sausen ließ.

Ein Kennzeichen für die überhitzte bodennahe Luftschicht ist es ferner, wenn die Temperaturen im oberen Flachsproß und in der Oberseite des unteren Flachsprosses auf wenige zehntel Grad zusammengedrückt sind, und es muß ebenso die Wirkung dieser heißen Luft sein, wenn die Unterseite des unteren Sprosses um $1,2^\circ$ wärmer ist als die Oberseite. Denn eine Reflexstrahlung scheidet bei der geringen Höhe (3,5 cm) aus, und die von dem Sproß beschattete Unterlage liegt in ihrer Temperatur (wie ein späterer Versuch gezeigt hat) unterhalb der Sproßtemperaturen.

Auch die detaillierte Analyse des weiteren Tagesganges, auf deren ausführliche Darstellung hier verzichtet werden muß, beweist, daß es die erhitzte bodennahe Luft ist, die hier temperaturwirksam ist. Denn um 11 Uhr wird sie durch den starken Temperaturfall in der Bodenoberfläche (Strahlungsrückgang) zusammen mit dem auf Stärke 5 aufgefrischten Wind beseitigt. Damit verschwindet zugleich die Übertemperatur des unteren Sprosses gegen den oberen (denn je näher dem Boden, um so stärker ist der Temperaturrückgang in der bodennahen Luft). Diese Übertemperatur könnte erst mit der anschließenden Regeneration dieser überheißen Luft wieder erreicht werden (die Tendenz dazu ist zu erkennen), doch wird der Endzustand wegen eines neuerlichen Temperaturfalles nicht erreicht.

Der naheliegende Versuch, neben den Temperaturen in einem dicht über dem Boden liegenden Flachsproß auch die Lufttemperaturen unmittelbar über und unter

ihm zu prüfen, wurde durch sehr veränderliche Einstrahlung, durch stärkere Luftbewegung und durch niedrige Lufttemperaturen so ungünstig beeinflusst, daß er hier nicht beispielhaft vorgeführt werden kann. Doch zeigt sich in dem noch ungestörten Teil am frühen Vormittag, daß die Luft unter dem Sproß (wie über ihm) sehr wohl wärmer sein kann als seine Unterseite ($2-1^{\circ}$). Trotz des heftigen Windes klettern die Lufttemperaturen beiderseits des Sprosses auf 35° an (Sproßtemperaturen bis auf 42°). Da wir am 19. 7. — bei geringer Windstärke — oberhalb des Flachsprosses über

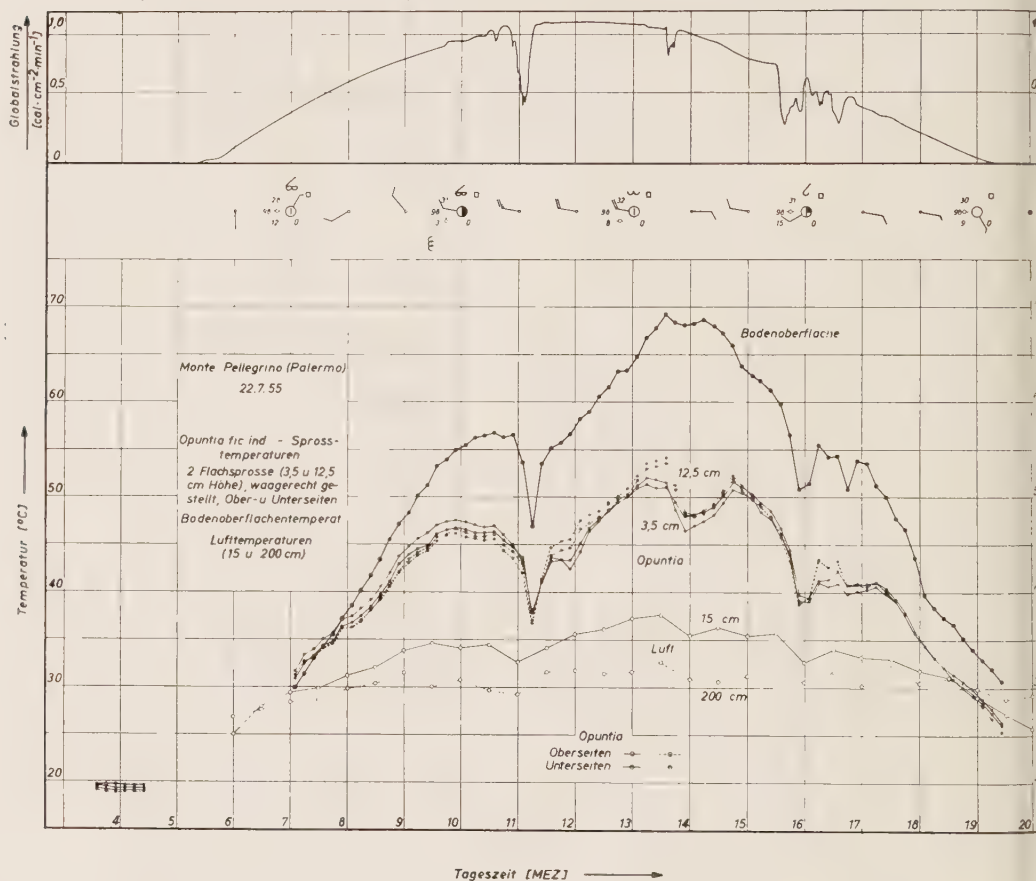


Abb. 14. Tagesgang der Temperatur und Temperaturverteilung in zwei Flachsprossen von *Opuntia ficus indica* in horizontaler (Zwangs-)Lage in verschiedener Höhe über dem Boden (22. 7. 1955 auf dem Monte Pellegrino bei Palermo).

45° (Sproßtemperatur 50°) gefunden haben, müssen wir mit derartigen Umgebungstemperaturen rechnen. Sie müssen bei mangelhaftem Austausch noch steigen und können also durchaus zu höheren Gleichgewichtstemperaturen in pflanzlichen Organen führen.

Zu dieser Frage nach der höheren Temperatur der Unterseite von Flachsprossen noch eine weitere Beobachtung vom 25. 7., dem Tage vor dem Einbruch afrikanischer Warmluft (Abb. 15).

Die ungestörte Einstrahlung in bekannter Stärke hat die Temperatur der Bodenoberfläche auf über 67° ansteigen lassen. Die Lufttemperatur in 200 cm Höhe hat ihr Tagesmaximum mit 33° bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 30–40 %. Der Wind weht nur schwach (Beaufort 1 und 2). Die bodennahe Luftschicht (15 cm Höhe) ist bis auf 35° erhitzt und zeigt eine Temperaturabnahme (0–15 cm) von etwa $2,3^{\circ}/\text{cm}$.

Zwischen 13.20 und 15 Uhr geht die Strahlung leicht, aber doch konstant, vorübergehend zurück. Dieses ist nicht die Folge einer (geringen) Bewölkung, sondern eher durch eine Trübung der Luft bedingt, die dem ermüdeten Beobachter nicht weiter auffiel. Mit diesem leichten Rückgang der Strahlung geht auch die Temperatur der Bodenoberfläche um ein geringes herunter. Lufttemperatur in 200 und in 15 cm Höhe nehmen dagegen zu! Die Windleiste der graphischen Darstellung gibt darüber Aufschluß: aus südwestlicher Richtung weht schwach ein warmer und trockener Wind (Taupunkt- abnahme), der auf die Temperatur der Flachspresse sehr bezeichnend einwirkt.

Die Temperatur des Flachsprosses (in 12 cm Höhe), die seit den Morgenstunden auffällig unter der des bodennäheren Sprosses (3,5 cm) liegt¹⁾ — um 13 Uhr beträgt der Unterschied noch 4° —, steigt plötzlich in der genannten

1) Die bodennahe Luft ist nicht so stark erhitzt wie am 22. 7. (Abb. 14).

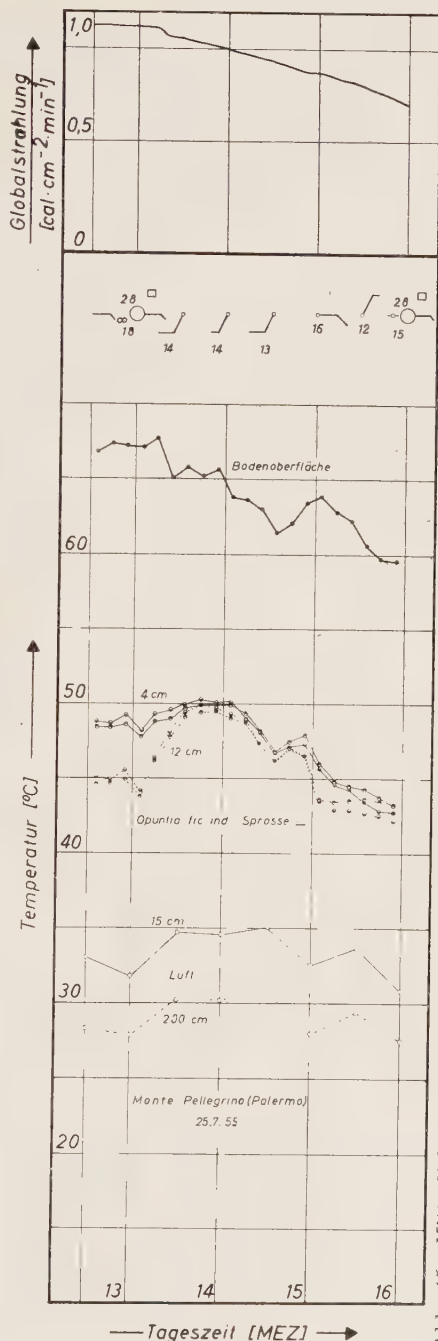


Abb. 15. Mittäglicher Teil eines Tagesganges der Temperatur und Temperaturverteilung in zwei Flachspossen von *Opuntia ficus indica* in horizontaler (Zwangs-)Lage in verschiedener Höhe über dem Boden (25. 7. 1955 auf dem Monte Pellegrino bei Palermo).

Zeit stark an und erreicht auf $0,5^{\circ}$ die Temperatur des unteren Sprosses. Dieser hingegen zeigt keinen derartig großen Anstieg seiner Temperatur, d. h. er wird durch den Warmlufteinbruch nicht unmittelbar betroffen¹⁾.

Seit 14 Uhr gehen die Temperaturen der Flachspresse infolge des normalen Strahlungsrückganges am Nachmittage langsam zurück. Dabei werden aber bei beiden (!) die Unterseiten wärmer als die abstrahlenden Oberseiten. (Ende des Warmlufteinbruches um 16 Uhr.)

Aus keinem der anderen zahlreichen Versuche mit horizontal stehenden Flachsprossen liegt eine gleiche Beobachtung vor, daß auch die Unterseite eines bodenferneren Sprosses — die ja im Strahlungsaustausch mit dem darunter liegenden Exemplar steht — wärmer werden kann. Und zwar kommt als Ursache dafür ganz augenscheinlich nicht ein Strahlungseffekt (Ausstrahlung oder Bodenrückstrahlung) in Frage, sondern es ist die bodennahe Luft, die auch hier auf der Unterseite Bedingungen schafft, die zu einer höheren Gleichgewichtstemperatur führen müssen.

Diese Analysen zeigen, daß es nicht die Reflex- oder Bodenrückstrahlung sein kann, die zu einem Energiegewinn der Unterseite eines horizontal stehenden Flachsprosses führt. Es ist die bodennahe heiße Luft, die infolge verminderten Austausches durch ein geringes Temperaturgefälle und durch eine behinderte Verdunstung eine Temperaturerhöhung bewirkt. Damit wird die Bedeutung einer Profilstellung erweitert. Sie ist nicht nur ein Ausweichen vor zu starkem Strahlungsgewinn, sondern zugleich auch eine Stellung, die einen besseren Wärmeübergang und eine bessere Verdunstung bedeutet, durch die einer tödlichen Überhitzung in dem so extrem entwickelten Mikroklima vorgebeugt wird.

6. Die Temperaturen in dünnen Blättern von *Eucalyptus globulus*

Versuche, die Temperaturen dünner pflanzlicher Organe, z. B. der Blätter von *Eucalyptus globulus*, in einem Tagesgang zu registrieren, scheiterten an zwei Umständen:

1. Die Thermoelemente waren immer noch zu dick, um in einem dünnen Blatt für längere Zeit eingestochen zu bleiben und dabei dieses nicht zu schädigen. Die Verletzung ist zu stark und wird — bei längerem Verweilen — durch die natürlichen, meist gegenläufigen Bewegungen von Blatt und Thermoelement weiter vergrößert.

2. Bei stärkerer Luftbewegung glitten die Thermoelemente im allgemeinen früher oder später aus ihren Einstichen heraus. Werden sie stärker befestigt, überträgt sich die Bewegungshemmung auf die zu untersuchenden Objekte, die damit nicht mehr unter natürlichen Bedingungen stehen.

1) Wir müssen allerdings einschränken insofern, als von dem Rückgang der Bodenoberflächentemperatur auch die unmittelbar dem Boden aufliegende Luft betroffen werden muß. Die Wirkung der eingeflossenen Warmluft ist hier wohl durch einen gleichzeitigen Rückgang der Temperatur der umgebenden Luft (3,5 cm) maskiert.

Die Versuchsfragmente werden hier nur qualitativ abgehandelt.

a) Die nächtlichen Temperaturen

Die Temperatur eines Blattes von *Eucalyptus globulus* (in 20 cm Höhe) mit Profilstellung (SSW-orientiert) lag in den Nachtstunden stets unterhalb der Temperatur der umgebenden Luft (15 cm), sobald sich die nächtliche Temperaturverteilung eingestellt hatte (hier noch vor 20 Uhr). Bei Windstille bzw. geringer Luftbewegung sank dabei die Temperatur eines solchen Blattes rund 1° unter die Temperatur der Luft und lag ebenso unter der Temperatur der Bodenoberfläche (in gleicher Größenordnung auch in den hier nicht angeführten Gambacher Registrierungen). Bei Warmluftzufuhr durch Scirocco stiegen Blatt- und Lufttemperaturen erheblich ($4\text{--}5^{\circ}$) über die Temperatur der Bodenoberfläche; zugleich vergrößerte sich auch die Differenz Luft-Pflanze auf $2\text{--}3^{\circ}$. Diese Differenzen sind die Folge der Transpiration, die bei dem trockenen Scirocco noch gesteigert wird. Die Gleichsinnigkeit des Temperaturverlaufes von Pflanzen und umgebender Luft aber bestätigt erneut, wie stark das Konvektionsglied (L) die nächtlichen Gleichgewichtstemperaturen bestimmt — hier an dünnen Organen besonders deutlich ausgeprägt.

b) Die Tagestemperaturen

Am Tage stiegen bei voller Einstrahlung auf die Blattfläche (Profilstellung) die Temperaturen zum Teil hoch an (maximaler Einzelwert $45,5^{\circ}$; Luft (15 cm) 35° ; Bodenoberfläche 48° ; vgl. die fast gleich hohen Blatttemperaturen bei den Gambacher Untersuchungen). Doch wird eine solche Temperaturhöhe sehr schnell wieder verlassen. Denn bei der Luftbewegung sorgt einmal der gute Wärmeübergang an die umgebende Luft für Energieabgabe, wie an dem wirren Streuen der Temperaturwerte und an der Gleichsinnigkeit des Temperaturverlaufes bei Luft und Pflanze zu erkennen ist.

Obwohl an dem einen der hier betrachteten Tage nachmittags die Einstrahlung noch groß (Profilstellung) und die Lufttemperatur (200 cm) mit 30° hoch ist, bleibt das Blatt (etwa 32°) nur maximal $2\text{--}3^{\circ}$ wärmer als die umgebende Luft (15 cm). Der stürmische Wind (Beaufort 6—7) hebt die Wirkung der nachmittäglichen vollen Einstrahlung auf die profilstehende Blattspreite wieder auf und führt zu einem gleichmäßigen Temperaturniveau. Da die Luft sehr trocken ist ($[E-e] = 20$ Torr; relative Luftfeuchtigkeit 25 %, nachts sogar 12 %), muß bei dem starken Wind (α geht ja auch in das Verdunstungsglied $[V]$ ein) die Verdunstung erheblich gesteigert sein. Dies ist die zweite, wirksamere Möglichkeit der Energieabgabe eines Blattes.

Die schädlichen Folgen derartiger Scirocchi auf die Vegetation sind nicht durch ihre hohen Lufttemperaturen verursacht: Wir sahen auch schon am Beispiel der *Opuntia* (s. S. 529), daß diese hohen Lufttemperaturen keineswegs zu hohen Organtemperaturen führen, wie sie bei niedrigeren Lufttemperaturen, aber schwacher Luftbewegung zu finden sind. Aber diese trockenen und heißen Winde steigern die Transpiration der Pflanze derartig, daß bei dem ariden Boden das Wasserdefizit bedrohlich wird. Ich konnte beobachten, wie nach dem großen Scirocco am 26. Juli nahezu alle *Eucalyptus*-Jungexemplare verfielen: zahllose Blätter verdorrt, die anderen hingen schlapp an ihren Stielchen.

Ein anschließend begonnener Vergleichsversuch an Blättern künstlich bewässerter und unbewässerter Eucalypten scheiterte an ungünstigen Witterungsbedingungen.

7. Luft- und Rindentemperaturen in einem Jungexemplar von *Pinus pinea* (= *domestica*).

Die Beobachtung, daß sich bei *Pinus* die welken Nadeln (bzw. bei *Eucalyptus* die Blätter) kegelförmig um die Hauptachse anordneten, ließ vermuten, daß in diesen buschigen, dichtbenadelten und kaum doppelt spannhohen Gewächsen bei der festgestellten heißen bodennahen Luft sehr hohe Luft- und Organtemperaturen zu finden wären. Der Luftaustausch ist ja sehr behindert, es sei denn, ein starker Wind durchbliese das Nadelgewirr. Die hier gefundenen Temperaturverhältnisse geben zugleich einen Anhalt für ähnliche Temperaturverteilungen in stark behaarten oder auch sonst dem ungehinderten Austausch wie der Einstrahlung entzogenen pflanzlichen Organen (s. HERZOG).

So wurden einmal die Temperaturen der Bodenoberfläche und der Luft in 1,5 cm Höhe über dem Boden, die Temperatur der Rinde auf der SW-Seite des Stämmchens in Höhe der Bodenoberfläche gemessen, und zwar am ersten Tage (10./11. 8.) in benadeltem Zustand, am zweiten (11./12. 8.) war der untere Teil etwa 10 cm hoch von Nadeln völlig freigestellt.

Die Witterung an den beiden Versuchstagen war einheitlich, mit Lufttemperaturen (200 cm) zwischen 23 und 25° und schwächerem Wind (bis Beaufort 3 und 4). Wegen der leichten Bewölkung stieg die Temperatur der Bodenoberfläche nur auf 55 bzw. 62° an; die Temperatur der bodennahen Luft (1,5 cm) lag dabei zwischen 35 und 40°.

Das benadelte (und damit der Ein- und Ausstrahlung praktisch entzogene) Stämmchen unterscheidet sich von dem unbenadelten (und damit der Ein- und Ausstrahlung wie der Konvektion unterworfenen) ganz erheblich. In der Nacht, in der die Rindentemperatur vor allem durch die Konvektion (L) bestimmt wird, besteht (absolut genommen) zwischen beiden zwar kein Unterschied, bezogen auf die Temperatur der (ausstrahlenden)

Bodenoberfläche aber liegt die Rindentemperatur des benadelten Stämmchens um maximal 3° über der des unbenadelten. Gleichzeitig zeigt sich der Temperaturgang frei von den Schwankungen der Lufttemperatur, die sich dem Temperaturgang des unbenadelten Stämmchens aufprägen.

Am Tage ist umgekehrt die unbenadelte Rinde (absolut genommen) bis zu 9° , auf die Temperatur der Bodenoberfläche bezogen aber bis zu 17° wärmer als die benadelte. Deren Temperaturverlauf ist wieder sehr gleichmäßig und frei von den Schwankungen der Lufttemperatur, die zusammen mit der Strahlung den Temperaturgang des unbenadelten Stämmchens gestaltet.

Eine Benadelung verhindert demnach die Temperaturschwankungen kurzfristigen Charakters und vermindert die langfristigen, so daß der Temperaturgang ausgeglichen ist. Die Nadeln wirken nicht nur als ein Strahlungsschutz, sondern halten auch die umgebende Luft als schützende Hülle fest (vgl. dagegen HERZOG).

In einem weiteren Versuch wurden die Lufttemperaturen innerhalb, an der Peripherie und außerhalb eines benadelten Kiefernjungexemplares gemessen. Die allgemeine Witterung dieses Versuchstages (19. 8.) war — abgesehen von schwächerem Wind (Beaufort 2) und durchfeuchtetem Boden — nicht merklich von den beiden anderen Tagen unterschieden. Doch war es inzwischen schon recht herbstlich geworden, und die Temperatur der bodennahen Luft (6 cm) mit 28° ist niedrig zu nennen.

Doch steigt selbst unter diesen mäßigen Bedingungen die Temperatur der Luft im Inneren eines solchen Stämmchens (6 cm) auf 4° über die der Luft außerhalb desselben an. Sie unterliegt nicht den zufälligen Schwankungen wie diese, sondern schwingt in großen, über eine Stunde langen Wellen ausgeglichen dahin. Es ist daher anzunehmen, daß bei großer Überhitzung der bodennahen Luft eine irgendwie im Inneren eines Nadelkleides festgehaltene Luft über die Temperatur der ohnehin schon extrem heißen Luft außerhalb ansteigen und damit für die einzelnen Partien wirksam werden kann.

Abschließende Besprechung der Ergebnisse

Wie seit GREGOR KRAUS (1911) mehrfach gezeigt und in der vorliegenden Arbeit mit modernen registrierenden Methoden eingehender verfolgt werden konnte, findet sich auf xerothermen Standorten ein extrem entwickeltes Mikroklima. Denn bei der Trockenheit dieser Böden steht die zugestrahlte Energie fast vollständig der Erwärmung der Bodenoberfläche zur Verfügung. Diese Trockenheit ist daher das primäre. Sie schränkt entweder (bei permanenter Wasserknappheit) den Bedeckungsgrad so ein, daß ein mehr oder weniger großer Teil der Bodenoberfläche offen der Einstrahlung ausgesetzt bleibt, oder sie läßt (bei einer ausgeprägten Dürrezeit) eine reichlichere Vegetation zu einer trockenen Streuschicht mit einer sehr schlechten Wärmeleitfähigkeit werden. Beides führt sekundär zu einer

starken Überhitzung der Unterlage. Sprachlich sind diese Standorte durch die Namen „xerotherm“ oder „trockenheiß“ treffend charakterisiert.

Trotz dieser harten Existenzbedingungen liegen (selbst bei intensiver Einstrahlung) die Temperaturen in den Pflanzen solcher xerothermen Standorte nicht — wie erwartet werden durfte — allzu hoch. D. h. in ihrer Energiebilanz muß einerseits durch die Konvektion (L) und durch die Transpiration (V) für eine ausreichende Wärmeabfuhr gesorgt sein. In beiden Gliedern der für die Energiebilanz aufgestellten Gleichung ist die Luftbewegung (Wind, aber auch Vertikalaustausch) durch die Wärmeübergangszahl α enthalten, und die Trockenheit der Luft (minimale Evaporation) wirkt sich hierbei in (V) durch ein größeres Sättigungsdefizit ($E - e$) förderlich aus. Andererseits muß ein zu großer Energiegewinn aus den einzelnen Energieströmen (vor allem aus der Strahlung) vermieden werden. Im Zusammenhang mit ihren anderen Lebensfunktionen paßt sich die Pflanze diesen Möglichkeiten an.

So ist auf diesen Standorten vielfach die Profilstellung der Blätter (oder analoger Organe) anzutreffen. Sie wird gemeinhin als Ausweichstellung vor zu intensiver Einstrahlung gedeutet, bei der neben der Globalstrahlung auch eine Reflex- oder Bodenrückstrahlung wirksam sein soll (SCHANDERL). Bei den vorliegenden Untersuchungen, insbesondere am Modell der thermisch trägen *Opuntia* in Sizilien, war jedoch unter natürlichen Bedingungen ein temperaturerhöhender Einfluß durch eine Rückstrahlung vom Boden her nicht nachzuweisen.

Daß die Profilstellung ein Ausweichen vor zu intensiver Einstrahlung und damit vor zu starker Erwärmung bedeutet, haben auch die vorliegenden Untersuchungen dargestellt. Doch muß eine Erklärung, die nur die Strahlungsverhältnisse berücksichtigt, unvollständig bleiben. So habe ich im mainfränkischen Wellenkalkgebiet an den zahlreichen und an verschiedenen Stellen wachsenden Exemplaren von *Lactuca serriola* (mit ihren steifen und unbeweglicheren Blättern) beobachten können, daß sich die Profilstellung (ohne eine bevorzugte Orientierung) vorwiegend in der unteren Blattregion fand, während weiter oben an der Pflanze mehr die horizontale Blattstellung vorherrschte. Ebenso ist bei den Opuntien im Mittelmeergebiet unter den Profilstellungen (fast ausschließlich) — selbst weit oberhalb des Bodens — keine ausgezeichnete Richtung festzustellen. Oft kommen Schräglagen vor, in welchen sie von steiler Sonnenstrahlung voll getroffen und hoch erwärmt werden können.

Solange aber bei pflanzlichen Organen die Bedingungen für eine gute Energieabfuhr gegeben sind, kann sich auch bei starker Einstrahlung keine Übertemperatur halten. Bei Annäherung an den Boden wird jedoch diese

Wärmeabfuhr infolge des geringen Temperaturgefälles zur umgebenden Luft und wegen der in Bodennähe minimalen Luftbewegung sehr klein. Stände jetzt die Masse der Blätter noch horizontal, dann würde zu der intensiveren Einstrahlung auch ein noch schlechterer Wärmeübergang und eine Verringerung des Wasserdampfgefälles infolge des gehinderten Austausches treten. Eine Profilstellung aber vermeidet nicht nur die zu starke Einstrahlung, sondern vergrößert zugleich die Wärmeabgabe durch bessere Austauschmöglichkeit dieser heißen und labilen bodennahen Luft.

Zusammenfassung

1. Mit einem Sechs-Farben-Punktschreiber (Multithermographen) wurden auf je einem xerothermen Standort in Mitteleuropa (Mainfranken) und im Mittelmeergebiet (Sizilien) 24stündige Tagesgänge der Temperatur in Pflanzen (*Lactuca serriola*, *Lactuca perennis*, *Peucedanum cervaria*, *Eryngium campestre*; *Opuntia ficus indica*, *Eucalyptus globulus*, *Pinus pinea*) am natürlichen Standort unter natürlichen und unter experimentellen Bedingungen registrierend aufgenommen. Gleichzeitig wurden die einwirkenden Außenfaktoren (wie Strahlung, Wind usw.) gemessen oder beobachtet. Die Ergebnisse werden dargestellt unter dem Gesichtspunkt der Energiebilanzaufstellung für einen Versuchskörper.

2. Die mikroklimatischen Bedingungen auf xerothermen Standorten werden beschrieben und die Bedeutung einer extrem heißen bodennahen Luftschicht für den Wärmehaushalt der Pflanze herausgearbeitet.

3. Die gefundenen Pflanzentemperaturen überschritten nicht die bisher durch Einzelmessungen bekannten Maximalwerte (45—55°). Es ist anzunehmen, daß sich die Temperaturen in Pflanzen mediterraner Standorte nicht wesentlich von denen mitteleuropäischer Standorte unterscheiden.

4. Unter Berücksichtigung aller Faktoren der Energiebilanz wird für die auf xerothermen Standorten häufige Profilstellung eine erweiterte Erklärung gegeben.

Die vorliegende Arbeit wurde auf Anregung von Herrn Professor Dr. BRUNO HUBER unternommen, dem ich für sein Interesse an ihrem Fortgang und für seine Unterstützung aufrichtig danke.

Mein besonderer Dank gilt ferner Herrn Professor Dr. HANS BURGEFF und seiner verehrten Frau, die mir in liebenswürdiger Weise jede Hilfe in der kleinen Station am Krainberg zukommen ließen. Und mein Dank für die Unterstützung ist gerichtet an Herrn Professor Dr. ALDO PAVARI (Florenz) und die Herren der sizilianischen Forstverwaltung (Assessorato Regionale Agricoltura e Foreste), Isp. dott. EMILIO PALTRI-NIERI und dott. GUIDO LAURE.

Literatur

- ALBRECHT, F., 1940. Untersuchungen über den Wärmehaushalt der Erdoberfläche in verschiedenen Klimagebieten. R. f. W. Wiss. Abh. 8, Nr. 2. — ALT, E., 1932. Klimakunde von Mittel- und Südeuropa. KÖPPEN-GEIGER, Hdb. d. Klimatologie III N₂. Berlin. — ATMANATHAN, S., s. RAMDAS. — BARTELS, J., 1930. Temperaturmessung in Bodennähe und Aspiration. Met. Z. **47**, 76. — BAUMGARTNER, A., 1956. Untersuchungen über den Wärme- und Wasserhaushalt eines jungen Waldes. Ber. dtsh. Wetterd. **28** Bd. 5. Kissingen. — BERGER-LANDEFELDT, U., 1954. Zur schnellen Registrierung von Temperatur und Dampfdruck bzw. Taupunkt in und über Pflanzenbeständen. Ber. dtsh. bot. Ges. **67**, 356. — BOSIAN, G., 1933. Transpirations- und Assimilationsbestimmungen an Pflanzen des Zentralkaiserstuhls. Zschr. f. Bot. **26**, 209. — BROWN, H. T. u. ESCOMBE, F., 1905. Researches on some of the processes of green leaves. Proc. Roy. Soc. London **76** B, 29. — DIEM, M., 1953. Feuchtemessung mit Hilfe thermoelektrischer Psychrometer. Arch. f. Met., Geoph. u. Biokl. Ser. B, Bd. 5, 1. Heft, 59. — FRITZSCHE, G., 1933. Untersuchungen über die Gewebetemperaturen von Strandpflanzen unter dem Einfluß der Insolation. Beih. bot. Zbl. **50/1**, 251. — GEIGER, R., 1950. Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig 3. — Ders., 1934. Gibt es eine Lufttemperatur der bodennahen Luftschicht? Biokl. B. **1**, 115. — GERLACH, E., 1929. Untersuchungen über die Wärmeverhältnisse der Bäume. Diss. Leipzig. — GRUNDMANN, W., 1939. Temperaturmessung. Braunschweig. — GUTTENBERG, H. v., 1927. Studien über das Verhalten des immergrünen Laubwaldes der Mediterranflora zu verschiedenen Jahreszeiten. Planta **4**, 726. — HARDER, R., 1930. Beobachtungen über die Temperatur der Assimilationsorgane sommergrüner Pflanzen der algerischen Wüste. Zschr. f. Bot. **23**, 703. — HELLIG, H., 1931. Untersuchungen über Klima, Boden und Pflanzenleben des Zentralkaiserstuhls. Zschr. f. Bot. **24**, 225. — HERZOG, F., 1938. Formgestalt und Wärmehaushalt bei Succulenten. Jb. wiss. Bot. **87**, Heft 2/3, 211. — HOFMANN, G., 1956. Verdunstung und Tau als Glieder des Wärmehaushalts. Planta **47**, 303. — Ders. Die Temperaturmessung als Basis meteorologischer Meßverfahren. Mitt. Met. Inst. München. — HUBER, B., 1935. Der Wärmehaushalt der Pflanzen. Freising/München. — Ders., 1937. Mikroklimatische und Pflanzentemperatur-Registrierungen mit dem Multithermographen von HARTMANN u. BRAUN. Jb. wiss. Bot. **84**, 671. — Ders., 1947. Versuche zur Messung des Wasserdampf- und Kohlendioxydaustausches über Pflanzenbeständen. Sitz. Ber. Akad. Wien, Math.-nat. Kl. Abt. I, 155. Bd., 3. u. 4. Heft, 97. — KNAPP, R., u. LINSKENS, H. F., 1953. Beobachtungen über den Einfluß einiger mediterraner Pflanzengesellschaften auf Mikroklima und Bodenfeuchtigkeit. Ang. Bot. **27**, 48. — KONIS, E., 1950. The effect of leaf temperature on transpiration Ecology **31**. — KRAUS, G., 1911. Boden und Klima auf kleinstem Raum. Jena. — Ders., 1906. Anemometrisches vom Krainberg bei Gambach. Verh. phys.-med. Ges. Würzburg. — LAUSCHER, F., 1937. Grundlagen des Strahlungsklimas der Lunzer Kleinklimastationen. Beih. Jb. Zentr. Anst. f. Met. Wien, Jg. 1931. Wien. — MÄDE, A., 1952. Zur Methodik mikroklimatischer Temperaturmessungen. Ang. Met. I, **7**, 215. — OLBERS, W., 1951. Die Meßgenauigkeit des Bimetall-Strahlungsschreibers nach ROBITZSCH. (Votr. Geophys. Koll. Hambg.). Mitt. Instr. Abt. d. MANWD Nr. **20**. — PASSERINI, N., 1901. Sullo sviluppo di calore in alcune piante e sulla temperatura che assumono gli organi vegetali durante la insolatione. N. Giorn. bot. Ital. N. S. **8**, 64. — PAVARI, A., 1930. Esperienze ed indagini sulla tecnica del rimboscimento nelle regioni a clima caldo-arido. Firenze. — DE PHILIPPIS, A., 1939.

Sulla tecnica di preparazione del suolo per il rimboschimento in clima caldo-arido. Pubbl. R. Staz. Sper. Selvicolt. Firenze. (M. deutscher Zusammenfassung.) — RASCHKE, K., 1955. A method for the micro-meteorological measurement of the energy-budget of a leaf in situ. Thesis Poona. — RAMDAS, A. L., and ATMANATHAN, S., 1932. The vertical distribution of air temperature near the ground during night. Gerl. Beitr. **37**, 116. — ROUSCHAL, E., 1938. Zum Wärmehaushalt der Macchiepflanzen. Ö. Bot. Zschr. **87**, 1, 42. — SCHANDERL, H., 1930. Ökologische und physiologische Untersuchungen an der Wellen- und Muschelkalkflora des Maintales zwischen Würzburg und Gambach. Planta **10**, 756. — Ders., 1932. Ökologische Untersuchungen an sogenannten Kompaßpflanzen. Planta **16**, 709. — Ders., 1937. Der derzeitige Stand des Kompaßpflanzenproblems. Biokl. B. **4**, 49. — TRANQUILLINI, W., 1954. Über den Einfluß von Über-temperaturen der Blätter bei Dauereinschluß in Küvetten auf die ökologische CO₂-und Assimilationsmessung. Ber. dtsh. bot. Ges. **67**, 191. — VOLK, H. O., 1937. Über einige Trockenrasengesellschaften des Würzburger Wellenkalkgebietes. Beih. bot. Zentralbl. **57**, Bd. 3. — WALTER, H., 1955. Die Klimadiagramme als Mittel zur Beurteilung der Klimaverhältnisse für ökologische, vegetationskundliche und landwirtschaftliche Zwecke. Ber. dtsh. bot. Ges. **68**, 331. — WEISE, R., 1956. Wie beeinflußt die Erziehungsform die Temperatur im Rebinneren? Weinberg und Keller **3**, 332 u. 383.

Anschrift des Verfassers: Dr. A. VAUPEL, Neustadt/Weinstraße; Villenstraße 15, Agrarmeteorologische Versuchs- und Beratungsstelle.

Meinem toten Vater

Lebenslauf

Am 14. Februar 1923 wurde ich in Berlin als Sohn des Staatsarchivdirektors und Honorarprofessors der Philipps-Universität zu Marburg/Lahn, Dr. RUDOLF VAUPEL und seiner Ehefrau MARIE, geb. VOCKRATH, geboren. Meine Schulzeit auf dem Gymnasium schloß 1941 mit dem Zeugnis der Reife ab. Es folgten 4 Jahre Frontdienst in der Sowjetunion, Frankreich und Italien. Auf der Philipps-Universität zu Marburg und auf der Ludwig-Maximilians-Universität zu München studierte ich Naturwissenschaften bei meinen Lehrern: Professor PIRSON und Professor STEFFEN (Botanik), Professor WALCHER (Physik), Professor GEIGER und Privatdozent Dr. HOFMANN (Meteorologie), Professor MEERWEIN (Chemie) und Professor v. FRISCH (Zoologie). Professor HUBER stellte mir die Aufgabe der vorgelegten Arbeit.
